

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**STUDI FILTER PASIF HARMONISA PADA SISI TEGANGAN RENDAH SISTEM  
KELISTRIKAN PT SEMEN TONASA UNIT II DAN III, SULAWESI SELATAN**

**Jason Dinovan Todo Tambun**

**NRP 07111440000110**

**Dosen Pembimbing**

**Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.**

**Dedet C. Riawan, S.T. M.Eng. Ph.D.**





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**STUDI FILTER PASIF HARMONISA PADA SISI TEGANGAN  
RENDAH SISTEM KELISTRIKAN PT SEMEN TONASA UNIT  
II DAN III, SULAWESI SELATAN**

Jason Dinovan Todo Tambun

NRP 07111440000110

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

Dedet C. Riawan, S.T. M.Eng. Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

Fakultas Teknologi Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

# **STUDY OF HARMONICS PASSIVE FILTER ON LOW VOLTAGE SIDE OF ELECTRIC POWER SYSTEM AT PT SEMEN TONASA UNIT II AND III, SOUTH SULAWESI**

Jason Dinovan Todo Tambun

NRP 07111440000110

Advisor

Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

Dedet C. Riawan, S.T. M.Eng. Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

Faculty of Electrical Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018

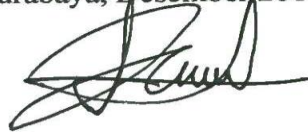


## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Studi Filter Pasif Harmonisa pada Sisi Tegangan Rendah Sistem Kelistrikan PT Semen Tonasa Unit II dan III, Sulawesi Selatan”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2017



**Jason Dinovan Todo Tambun**  
NRP 07111440000110





**LEMBAR PENGESAHAN**  
**STUDI FILTER PASIF HARMONISA PADA SISI**  
**TEGANGAN RENDAH SISTEM KELISTRIKAN PT**  
**SEMEN TONASA UNIT II DAN III, SULAWESI**  
**SELATAN**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.  
NIP 196603181990101001

Dosen Pembimbing II

Dedet C. Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.  
NIP 197311192000031001





# **STUDI FILTER PASIF HARMONISA PADA SISI TEGANGAN RENDAH SISTEM KELISTRIKAN PT SEMEN TONASA UNIT II DAN III, SULAWESI SELATAN**

**Nama : Jason Dinovan Todo Tambun**  
**Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.**  
**Pembimbing II : Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D.**

## **ABSTRAK**

Kegagalan sistem distribusi yang disebabkan oleh gangguan harmonisa adalah permasalahan cukup serius dalam sistem tenaga listrik. PT Semen Tonasa merupakan perusahaan yang bergerak di bidang industri semen. Perusahaan ini merupakan perusahaan produksi semen terbesar di Indonesia Timur yang terdiri dari empat unit, yaitu unit II, III, IV, dan V. Dalam studi ini diambil unit II dan III sebagai *plant* penelitiannya. Dalam proses produksi, motor-motor diperlukan untuk membantu pekerjaan tersebut. Motor-motor yang digunakan dalam *plant* ini tidak sepenuhnya menggunakan motor AC, tetapi terdapat beberapa motor DC. Dalam pengoperasian motor DC diperlukan konverter untuk mengubah listrik AC menjadi DC agar dapat memutar motor DC. Namun, penggunaan konverter dapat menimbulkan masalah harmonisa dalam sistem kelistrikan karena terdapat komponen non linear didalamnya dimana nilai impedansinya berubah saat tegangan mencapai nilai tertentu sehingga arus yang mengalir tidak sinusoidal lagi dan akan berpengaruh terhadap kualitas daya pada sistem kelistrikan yang ada serta dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan seperti trafo, kabel, dan motor. Oleh karena itu, untuk mencegah hal tersebut perlu dilakukan studi perencanaan pemasangan filter untuk meredam frekuensi harmonisa yang timbul. Pada tugas akhir ini dipilih pemasangan filter pasif pada sisi tegangan rendah untuk mereduksi gangguan harmonisa menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Selain itu, pada *plant* ini telah terdapat filter *single tuned* pada sisi tegangan menengah 6,3 kV sehingga pada tugas akhir ini juga akan dibandingkan keefektifan antara filter tegangan menengah (kondisi *existing*) dengan filter tegangan rendah dalam mereduksi gangguan harmonisa.

**Kata kunci :** filter pasif, gangguan harmonisa, tegangan rendah

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

# ***STUDY OF HARMONICS PASSIVE FILTER ON LOW VOLTAGE SIDE OF ELECTRIC POWER SYSTEM AT PT SEMEN TONASA UNIT II AND III, SOUTH SULAWESI***

***Name*** : Jason Dinovan Todo Tambun  
***1<sup>st</sup> Advisor*** : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
***2<sup>nd</sup> Advisor*** : Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D.

## ***ABSTRACT***

*The failure of distribution system that caused by harmonic distraction are serious problem in electric power system. PT Semen Tonasa is a company engaged in cement industrial field. The company is the largest cement industry in Eastern Indonesia which consists of four units, namely units II, III, IV, and V. In this study, units II and III are the research plants. In the production process motors are required to assist the work. The motors used in this plant do not fully use AC motors, but there are some DC motors. In the operation of a DC motor, converter is required to convert AC power into DC in order to operate the DC motor. However, the use of converter can cause harmonics problem in electric power system because there are non linear components in there which the impedance value change when voltage reach certain value so that current is not sinusoidal waveform again and will affect to power quality at electrical system and can cause damage to equipment such as transformers, cables, and motors. Therefore, to prevent this problem, it is necessary to study the planning of installation of filters to reduce the frequency of harmonics that arise. In this final project, the writer selects passive filter on low voltage side to reduce harmonic disturbance using ETAP 12.6.0 software. In addition, in this plant there has been a single tuned filter on the medium voltage side, 6.3 kV so that in this final project will also be compared the effectiveness between medium voltage filter (existing condition) with low voltage filter in reducing harmonic disturbance.*

***Keywords*** : passive filter, harmonics distortion, low voltage

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “*Studi Filter Pasif Harmonisa pada Sisi Tegangan Rendah Sistem Kelistrikan PT Semen Tonasa Unit II dan III, Sulawesi Selatan*”.

Tugas akhir ini merupakan salah satu mata kuliah yang harus ditempuh dalam persyaratan akademik program studi S1 di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Dalam proses penyusunan buku ini terdapat pihak-pihak yang sangat berjasa dalam membantu terwujudnya buku ini. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan hikmat dan rahmatnya hingga penyusunan buku Tugas Akhir ini berakhir
2. Kedua orang tua, adik, dan segenap keluarga penulis yang selalu memberikan semangat, kasih sayang serta dukungan baik moral maupun material.
3. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran dan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Putra dan seluruh karyawan PT Semen Tonasa yang telah membantu pengambilan data dalam tugas akhir ini
5. Seluruh teman-teman yang telah membantu pelaksanaan Tugas Akhir ini, yaitu Hadi, Luthfi, dan Cindra.
6. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, teman-teman e54, para dosen dan karyawan atas dukungan, masukan serta kerjasamanya sepanjang masa perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir ini.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik, saran serta koreksi yang membangun dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang.

Surabaya, Desember 2017

Penulis

---Halaman ini sengaja dikosongkan---



# DAFTAR ISI

	HALAMAN
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK.....	v
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sitematika Pembahasan.....	4
1.7 Relevansi dan Manfaat.....	5
BAB 2 HARMONISA DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK .....	7
2.1 Konsep Daya Listrik .....	7
2.2 Faktor Daya.....	7
2.2.1 Perbaikan Faktor Daya .....	8
2.3 Pengertian Harmonisa .....	9
2.4 Metode Fourier untuk Analisa Harmonisa .....	15
2.5 Indeks Harmonisa .....	16

2.5.1 <i>Individual Harmonic Distortion</i> .....	16
2.5.2 <i>Total Harmonic Distortion</i> .....	17
2.5.3 Batas Distorsi Harmonisa .....	17
2.6 Konverter sebagai Sumber Harmonisa .....	18
2.7 Pengaruh Harmonisa .....	20
2.8 Filter Pasif Harmonisa .....	21
2.8.1 <i>Single Tuned Filter</i> .....	21
2.8.2 <i>Double Tuned Filter</i> .....	23
2.8.3 <i>High Pass Filter</i> .....	23
<b>BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN DAN PEMODELAN PT SEMEN TONASA UNIT II DAN III</b> .....	<b>25</b>
3.1 Sistem Kelistrikan di Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III Sulawesi Selatan .....	25
3.1.1 Bus Pada Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III Sulawesi Selatan .....	28
3.2 Data Peralatan pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	32
3.2.1 Transformator pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III ...	32
3.2.2 Motor Tegangan Menengah Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	35
3.2.3 Filter Harmonisa Pasif .....	36
3.3 Sumber Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	37
<b>BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS GANGGUAN HARMONISA DAN PEMASANGAN FILTER PASIF HARMONISA PADA TEGANGAN RENDAH</b> .....	<b>43</b>
4.1 Simulasi dan Analisis <i>Load Flow</i> pada Bus Tegangan Menengah dan Bus Sumber Harmonisa .....	43
4.2 Simulasi dan Analisis Gangguan Harmonisa .....	44

4.2.1 Simulasi dan Analisis Gangguan Harmonisa Saat Filter Harmonisa Tegangan 6,3 kV Terhubung .....	45
4.2.2 Simulasi dan Analisis Harmonisa saat Filter Harmonisa Tegangan 6,3 kV Dilepas .....	46
4.3 Desain Filter Pasif Harmonisa .....	55
4.3.1 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 3 (1) ...	56
4.3.2 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 3 (2) ...	60
4.3.3 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus ID FAN KILN 3 ..	64
4.3.4 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 2 (1) ...	68
4.3.5 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 2 (2) ...	72
4.3.6 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus ID FAN KILN 2 ..	77
4.4 Perbandingan Gangguan Harmonisa Setelah Pemasangan Filter Pasif Harmonisa Sisi Tegangan Rendah .....	81
4.4.1 Simulasi dan Analisis Rugi-Rugi Daya Setelah Pemasangan Filter Tegangan Rendah .....	81
4.4.2 Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Rendah .....	81
4.4.3 Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Menengah, Bus 487 .....	82
BAB 5 PENUTUP .....	85
5.1 Kesimpulan .....	85
5.2 Saran .....	85
DAFTAR PUSTAKA .....	87
BIOGRAFI PENULIS .....	89
LAMPIRAN .....	91

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

## DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
<b>Gambar 2.1</b> Segitiga Daya.....	7
<b>Gambar 2.2</b> Skema Perbaikan Faktor Daya dengan Metode Kompensasi Daya Reaktif.....	9
<b>Gambar 2.3</b> Gelombang Tegangan dan Arus pada (a) Beban Linear (b) Beban Non-linear.....	10
<b>Gambar 2.4</b> Proses Pembentukan Gelombang Terdistorsi Harmonisa [7] .....	11
<b>Gambar 2.5</b> Rangkaian Sederhana Jaringan Sistem Tenaga Listrik ....	12
<b>Gambar 2.6</b> Rangkaian Pengganti Jaringan Sistem Listrik Saat menganalisis Gangguan Harmonisa .....	13
<b>Gambar 2.7</b> (a) Konverter 12 Pulsa (b) Konverter 6 Pulsa .....	19
<b>Gambar 2.8</b> Rangkaian Single Tuned.....	22
<b>Gambar 3.1</b> Pemodelan Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	27
<b>Gambar 3.2</b> Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 3 (1).....	39
<b>Gambar 3.3</b> Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 3 (2).....	39
<b>Gambar 3.4</b> Spektrum Harmonisa Arus ID Fan Kiln 3 .....	40
<b>Gambar 3.5</b> Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 2 (1).....	40
<b>Gambar 3.6</b> Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 2 (2).....	41
<b>Gambar 3.7</b> Spektrum Harmonisa Arus ID Fan Kiln 2 .....	41
<b>Gambar 4.1</b> Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 3 (1) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan .....	49
<b>Gambar 4.2</b> Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 3 (2) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan .....	50
<b>Gambar 4.3</b> Spektrum Harmonisa Charger ID Fan Kiln 3 Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan .....	51

**Gambar 4.4** Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 2 (1) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan.....52

**Gambar 4.5** Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 2 (2) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan.....53

**Gambar 4.6** Spektrum Harmonisa Charger ID Fan Kiln 2 Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan.....54

## DAFTAR TABEL

### HALAMAN

<b>Tabel 2.1</b> Standar IEEE 519-2014 untuk THD dan IHD tegangan [10]	17
<b>Tabel 2.2</b> Standar IEEE 519-2014 untuk THD arus [10] .....	18
<b>Tabel 3.1</b> Sumber Penyedia Daya Listrik di Pabrik Semen Tonasa unit II dan III Sulawesi Selatan .....	26
<b>Tabel 3.2</b> Bus-Bus Sumber Sebelum Masuk ke Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	28
<b>Tabel 3.3</b> Bus Tegangan Tinggi Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III	28
<b>Tabel 3.4</b> Bus Tegangan Menengah Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	29
<b>Tabel 3.5</b> Daftar Bus Tegangan 22 kV .....	30
<b>Tabel 3.6</b> Daftar Bus Tegangan Rendah .....	31
<b>Tabel 3.7</b> Rincian <i>Rating</i> , Daya Beban Terpasang, dan Persentase Kerja Beban pada Trafo Distribusi Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	32
<b>Tabel 3.8</b> Rincian <i>Rating</i> , Daya Beban Terpasang, dan Persentase Kerja Beban pada Trafo Motor Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	34
<b>Tabel 3.9</b> Rincian Data Motor Tegangan Menengah dan <i>Demand Factor</i> .....	35
<b>Tabel 3.10</b> Data Filter Pasif Harmonisa Tegangan Menengah .....	36
<b>Tabel 3.11</b> Sumber Harmonisa Terbesar pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	37
<b>Tabel 3.11</b> (lanjutan) Sumber Harmonisa Terbesar pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III .....	38
<b>Tabel 4.1</b> Data Hasil Simulasi <i>Load Flow</i> Kondisi <i>Existing</i> pada Bus Tegangan Menengah dan Bus Sumber Harmonisa .....	43
<b>Tabel 4.2</b> Besar $THD_I$ dan $THD_V$ pada Sumber Harmonisa saat Filter pada Bus 487 Terhubung .....	45
<b>Tabel 4.3</b> Besar $THD_V$ dan $THD_I$ pada Bus Tegangan Menengah 6,3 kV saat Filter pada Bus 487 Terhubung .....	45
<b>Tabel 4.4</b> Penentuan Standar %TDD .....	46

<b>Tabel 4.5</b> Besar $THD_I$ dan $THD_V$ pada Sumber Harmonisa saat Filter pada Bus 487 Dilepas .....	47
<b>Tabel 4.6</b> Tabel Perhitungan Faktor Daya akibat Gangguan Harmonisa .....	55
<b>Tabel 4.7</b> Orde yang akan Difilter pada Bus MD KILN 3 (1).....	56
<b>Tabel 4.8</b> Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 3 (1).....	60
<b>Tabel 4.9</b> Orde yang akan Difilter pada Bus MD KILN 3 (2).....	61
<b>Tabel 4.10</b> Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 3 (2).....	64
<b>Tabel 4.11</b> Orde yang akan Difilter pada Bus ID FAN KILN 3 .....	65
<b>Tabel 4.12</b> Spesifikasi Desain Filter Bus ID FAN KILN 3.....	68
<b>Tabel 4.13</b> Orde yang akan Difilter pada Bus MD Kiln 2 (1) .....	69
<b>Tabel 4.14</b> Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 2 (1).....	72
<b>Tabel 4.15</b> Orde yang akan Difilter pada Bus MD Kiln 2 (2) .....	73
<b>Tabel 4.16</b> Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 2 (2).....	77
<b>Tabel 4.17</b> Orde yang akan Difilter pada Bus MD Kiln 2 (2) .....	78
<b>Tabel 4.18</b> Spesifikasi Desain Filter Bus ID FAN KILN 2.....	80
<b>Tabel 4.19</b> Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Rendah antara Pemasangan Filter Tegangan Menengah dan Pemasangan Filter Tegangan Rendah .....	82
<b>Tabel 4.20</b> Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Menengah antara Pemasangan Filter Tegangan Menengah dan Pemasangan Filter Tegangan Rendah .....	83



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT Semen Tonasa merupakan perusahaan yang bergerak di bidang industri semen. Perusahaan ini merupakan perusahaan produksi semen terbesar di Indonesia Timur dengan kapasitas 5.980.000 ton semen per tahun [1]. PT Semen Tonasa telah mendirikan 5 unit pabrik namun pada topik tugas akhir ini dipilih unit II dan III sebagai *plant* penelitian. Dalam proses produksi, motor-motor diperlukan untuk membantu pekerjaan tersebut. Motor-motor yang digunakan dalam *plant* ini tidak sepenuhnya menggunakan motor AC, tetapi terdapat beberapa motor DC. Dalam pengoperasian motor DC diperlukan konverter untuk mengubah listrik AC menjadi DC agar dapat memutar motor DC. Namun, konverter memberikan kerugian terhadap sistem kelistrikan karena konverter menghasilkan gangguan harmonisa terhadap sistem kelistrikan. Hal tersebut dikarenakan konverter merupakan jenis beban non linear.

Harmonisa merupakan suatu gangguan dalam sistem kelistrikan yang mana nilai arus tidak sebanding dengan nilai tegangan sehingga bentuk gelombang arus bukan bentuk gelombang sinusoidal murni lagi melainkan jumlahan gelombang sinusoidal dasar dan gelombang harmonisanya [2]. Setiap orde harmonisa memiliki urutan fasa, yaitu urutan positif (+), negatif (-), dan nol (0) yang dapat memberikan kerugian ke peralatan listrik [3]. Urutan positif dapat membuat rugi-rugi daya semakin besar sehingga konduktor atau saluran menjadi panas [3]. Urutan negatif dapat menghasilkan torsi berlawanan dengan putaran motor sehingga arus yang diserap motor meningkat dan mengakibatkan motor menjadi panas. Urutan nol dapat menyebabkan adanya arus mengalir di fasa netral sehingga rugi-rugi daya semakin meningkat [3]. Semua permasalahan harmonisa akan berpengaruh terhadap efisiensi dan kualitas daya listrik sehingga gangguan ini perlu diredam dengan adanya filter pasif harmonisa [4].

Penelitian ini menggunakan standar harmonisa IEEE 519-2014. Berdasarkan kondisi *existing* pabrik, pada bus tegangan 6,3 kV telah dipasang filter pasif harmonisa *single tune*, tetapi berdasarkan hasil pengukuran, *total harmonic distortion* tegangan (THD<sub>v</sub>) pada beberapa bus tegangan rendah melewati batas yang telah ditetapkan standar IEEE 519-2014 tegangan dibawah 1 kV bernilai 8% sehingga dari keadaan

tersebut perlu dilakukan pemasangan filter pada sisi tegangan rendah *plant* tersebut dengan membandingkan keefektifan penggunaan filter pasif harmonisa antara tegangan rendah dan tegangan menengah (kondisi *existing*). Aplikasi simulasi yang akan digunakan pada penelitian ini adalah ETAP 12.6.0 dan filter yang akan didesain adalah filter pasif harmonisa.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Simulasi dan Identifikasi besaran frekuensi harmonisa,  $THD_V$  (*Total Harmonic Distortion Voltage*), dan  $THD_I$  (*Total Harmonic Distortion Current*) pada bus tegangan menengah dan bus sumber harmonisa, yaitu bus *MD Kiln 2* dan *3* dan bus konverter *ID Fan Kiln 2* dan *3* sistem kelistrikan pabrik PT Semen Tonasa Unit II dan III berdasarkan standar IEEE 519-2014.
2. Perbandingan keefektifan peredaman gangguan harmonisa antara pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan menengah (kondisi *existing*) dengan pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah.
3. Perancangan filter pasif harmonisa pada bus sumber harmonisa tegangan rendah, yaitu bus *MD Kiln 2* dan *3* dan bus konverter *ID Fan Kiln 2* dan *3* yang merupakan sumber utama gangguan harmonisa sistem kelistrikan pabrik PT Semen Tonasa Unit II dan III setelah pelepasan filter pasif sisi tegangan menengah.

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Menyimulasikan dan mengidentifikasi besaran frekuensi harmonisa,  $THD_V$ , dan  $THD_I$  pada bus tegangan menengah dan bus sumber harmonisa, yaitu bus *MD Kiln 2* dan *3* dan bus konverter *ID Fan Kiln 2* dan *3* sistem kelistrikan pabrik PT Semen Tonasa Unit II dan III berdasarkan standar IEEE 519-2014.

2. Membandingkan keefektifan peredaman gangguan harmonisa antara pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan menengah (kondisi *existing*) dengan pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah.
3. Merancang filter pasif harmonisa pada bus sumber harmonisa tegangan rendah, yaitu bus *MD Kiln 2* dan 3 dan bus konverter *ID Fan Kiln 2* dan 3 yang merupakan sumber utama gangguan harmonisa sistem kelistrikan pabrik PT Semen Tonasa Unit II dan III setelah pelepasan filter pasif sisi tegangan menengah.

## 1.5 Metodologi

Metode yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan judul tugas akhir agar penguasaan materi lebih baik. Studi yang akan dilakukan mengenai studi aliran daya, studi perhitungan dan analisis frekuensi harmonisa,  $THD_v$ , dan THDI, dan studi analisis dan perancangan filter pasif harmonisa.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilaksanakan agar dapat menyelesaikan masalah tentang load flow dan gangguan harmonisa pada sistem tenaga listrik PT. Semen Tonasa Unit II dan III, Sulawesi Selatan. Data yang diperlukan antara lain data spesifikasi transformator, spesifikasi konverter, spesifikasi generator, spesifikasi grid PLN, spesifikasi filter yang telah ada, dan spesifikasi seluruh beban.

3. Pemodelan dan Simulasi Sistem

Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan maka selanjutnya adalah mengolah data, memodelkan sistem tenaga listrik PT Semen Tonasa dan menyimulasikannya menggunakan *software* ETAP 12.6.0 dalam bentuk simulasi untuk mengetahui kondisi aliran daya dan gangguan harmonisa pada sistem kelistrikan tersebut.

4. Analisis Data

Dari hasil simulasi akan didapatkan data karakteristik gangguan harmonisa dari sistem kelistrikan kemudian mengolah data dengan menganalisis hasil data tersebut. Setelah pengolahan dan penganalisisan data, pembahasan selanjutnya adalah merancang filter pasif harmonisa lalu menyimulasikannya dengan *software* ETAP 12.6.0.

5. Penulisan Buku Tugas Akhir.

Penulisan laporan adalah rangkuman kesimpulan akhir dari beberapa rangkaian metodologi diatas untuk menggambarkan hasil serta analisis dan simulasi yang telah dilakukan.

## 1.6 Sitematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut:

1. BAB 1 Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi dan manfaat tugas akhir.

2. BAB 2 Dasar Teori

Bab ini secara garis besar membahas tentang teori penunjang yang digunakan dalam pembahasan tugas akhir ini, yang meliputi pengertian harmonisa, indeks harmonisa, sumber harmonisa, pengaruh harmonisa, dan fiter pasif harmonisa.

3. BAB 3 Sistem Kelistrikan Pabrik PT Semen Tonasa Unit II dan III Sulawesi Selatan.

Bab ini membahas tentang kondisi sistem kelistrikan yang terdapat pada Pabrik PT. Semen Tonasa unit II dan III Sulawesi Selatan meliputi pembangkit, beban, sumber harmonisa dan spektrum harmonisa yang terbangkit pada konverter *MD Kiln* 2 dan 3 dan konverter *ID Fan Kiln* 2 dan 3 yang merupakan sumber utama gangguan harmonisa *plant* ini.

4. BAB 4 Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas aliran daya pengaruh gangguan harmonisa keadaan *existing* sistem, tingkat gangguan harmonisa saat pemasangan filter sisi tegangan menengah (kondisi *exsiting*) dengan menggunakan software ETAP 12.6.0. Analisis dilakukan melalui perbandingan antara data hasil simulasi dengan standar kualitas daya yang digunakan secara internasional. Selanjutnya, akan dibahas desain filter, pemasangan filter, dan performa peredaman harmonisa di sistem kelistrikan Pabrik PT Semen Tonasa unit II dan III, Sulawesi Selatan.

## 5. BAB 5 Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil analisis penyelesaian kasus gangguan harmonisa yang telah diperoleh melalui simulasi.

### **1.7 Relevansi dan Manfaat**

Tugas akhir ini relevan dengan bidang studi teknik sistem tenaga listrik karena permasalahan harmonisa sangat memengaruhi keadaan dan komponen sistem tenaga listrik seperti motor, transformator, faktor daya, aliran daya, dan lain-lain sehingga mendukung penerapan dari mata kuliah bidang studi teknik sistem tenaga. Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat diterapkan di dunia industri yang memiliki permasalahan yang sama dalam lingkup harmonisa.
2. Dapat meningkatkan penguasaan IPTEK di bidang Peningkatan Kualitas Daya.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil permasalahan yang serupa untuk Tugas Akhirnya.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

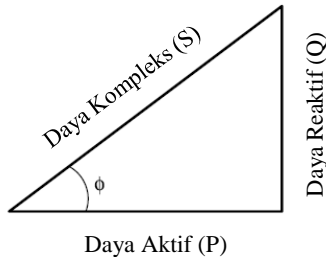
## BAB 2

### HARMONISA DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

#### 2.1 Konsep Daya Listrik

Daya listrik adalah besar energi yang mengalir tiap satuan waktu. Daya listrik dalam sistem kelistrikan AC terbagi menjadi tiga jenis, yaitu daya kompleks (S), daya aktif (P), dan daya reaktif (Q). Daya kompleks merupakan hasil perkalian dari tegangan kerja (V) dengan arus (I) yang mengalir atau jika dinyatakan dengan rumus  $S = V \times I$ . Ketiga jenis daya ini dapat saling diubah dengan menggunakan nilai sudut fasa ( $\phi$ ). Daya aktif dapat dinyatakan dengan rumus  $P = S \times \cos \phi$ . Daya reaktif dapat dinyatakan dengan rumus  $Q = S \times \sin \phi$ . Hubungan antara daya kompleks, daya aktif, dan daya reaktif dapat dilihat pada gambar 2.1, yaitu gambar segitiga daya. Dengan demikian, besar dari daya kompleks dapat dinyatakan dengan persamaan  $S = P + jQ$  dan nilai magnitudo dari daya kompleks dapat dinyatakan dengan rumus di bawah ini :

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.1)$$



**Gambar 2.1** Segitiga Daya

#### 2.2 Faktor Daya

Faktor daya ( $\cos \phi$ ) merupakan kosinus dari sudut antara arus dan tegangan atau dapat dikatakan juga sebagai perbandingan antara daya aktif (P) dengan daya kompleks (S) atau dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (2.2)$$

Berdasarkan konsep segitiga daya, semakin mengecilnya  $\cos \phi$  membuat nilai daya reaktif (Q) semakin meningkat. Besarnya daya reaktif yang mengalir, pada suatu sistem tenaga listrik memengaruhi setiap komponen dan kualitas daya sistem tersebut. Semakin besar daya reaktif yang mengalir pada suatu sistem tenaga listrik, semakin besar juga arus reaktif yang mengalir pada sistem tersebut maka nilai arus total yang mengalir juga semakin meningkat sehingga nilai dari rugi-rugi daya juga semakin meningkat yang dapat dirumuskan dengan  $P_{losses} = I^2R$  dengan  $P_{losses}$  adalah nilai rugi-rugi daya, I adalah nilai arus yang mengalir dan R adalah nilai resistansi saluran atau peralatan.

Selain itu, semakin besar daya reaktif yang mengalir pada suatu sistem kelistrikan juga memengaruhi nilai tegangan pada sistem tersebut karena apabila nilai arus semakin besar maka *drop* tegangan juga semakin besar yang mana dapat dirumuskan dengan  $\Delta V = I \times Z$  dengan  $\Delta V$  adalah nilai *drop* tegangan, I adalah nilai arus yang mengalir, dan Z adalah nilai impedansi saluran atau peralatan. Dengan demikian, semakin kecil faktor daya mengakibatkan kualitas daya semakin buruk, pembebanan peralatan semakin meningkat, dan biaya pemeliharaan dan investasi semakin meningkat [5] [6].

### 2.2.1 Perbaikan Faktor Daya

Untuk mengatasi permasalahan rendahnya faktor daya kita dapat memasang beberapa peralatan seperti generator sinkron, kondensor sinkron, motor sinkron, dan kapasitor bank [5]. Namun, diantara solusi tersebut untuk biaya yang paling murah adalah pemasangan kapasitor bank [5].

Perhitungan besar kapasitor bank yang dibutuhkan dapat dihitung dengan mencari daya reaktif kompensasi yang dibutuhkan. Setelah didapatkan daya reaktif kompensasi yang dibutuhkan selanjutnya adalah mencari nilai kapasitor bank yang dibutuhkan sesuai dengan hubungan kapasitor antar fasa. Persamaan tersebut dapat dijelaskan seperti persamaan di bawah ini :

$$Q_C = Q_1 - Q_2 \quad (2.4)$$

$$Q_C = P \tan \phi_1 - P \tan \phi_2 \quad (2.5)$$

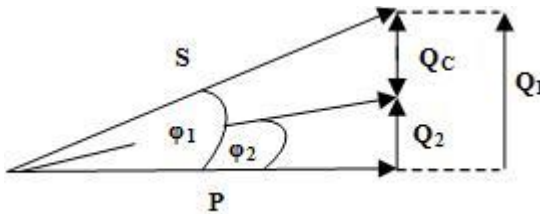
$$Q_C = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.6)$$



$$C = \frac{Q_C}{3 V_{LL}^2 \omega} \text{ (untuk hubungan delta)} \quad (2.7)$$

$$C = \frac{Q_C}{V_{LL}^2 \omega} \text{ (untuk hubungan wye)} \quad (2.8)$$

dengan keterangan  $Q_C$  adalah nilai daya reaktif kompensasi,  $P$  adalah nilai daya aktif (nilai cenderung konstan),  $C$  adalah nilai kapasitansi kapasitor bank,  $V_{LL}$  adalah nilai tegangan *line to line*, dan  $\omega$  adalah nilai frekuensi sudut sistem kelistrikan tersebut.

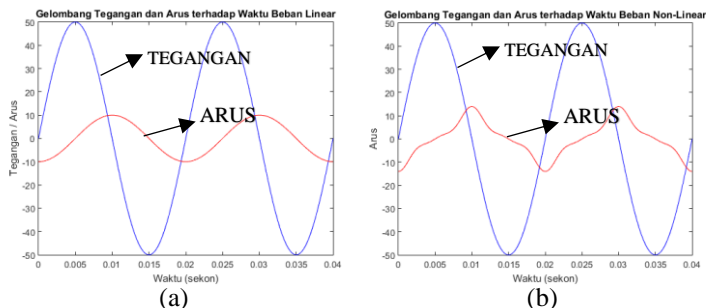


**Gambar 2.2** Skema Perbaikan Faktor Daya dengan Metode Kompensasi Daya Reaktif

Skema perbaikan faktor daya dapat dilihat pada gambar 2.2 bahwa apabila dipasang kapasitor bank maka terdapat daya reaktif kompensasi sebesar  $Q_C$  yang berasal dari kapasitor bank dengan mengurangi nilai daya reaktif awal yang mengalir sebesar  $Q_1$  sehingga besar daya reaktif setelah dikompensasi menjadi  $Q_2$  sehingga sudut fasa pun akan menjadi lebih kecil (dari  $\phi_1$  ke  $\phi_2$ ) dan faktor daya ( $\cos \phi$ ) semakin meningkat.

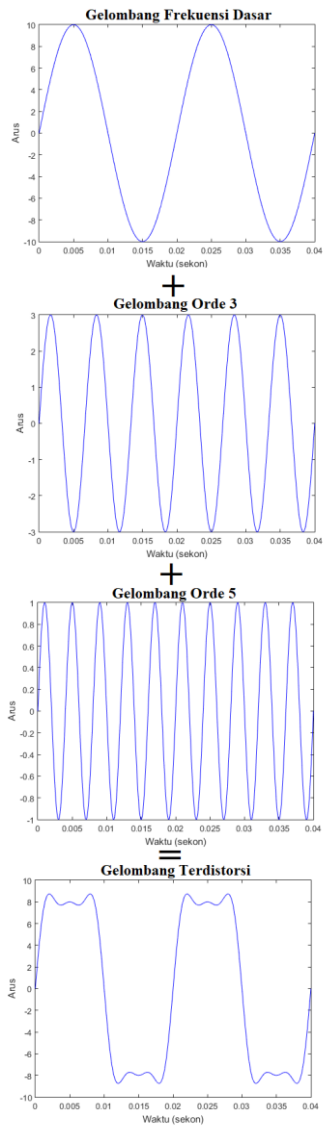
## 2.3 Pengertian Harmonisa

Dalam sistem tenaga listrik AC beban linear, gelombang tegangan dan arus berbentuk gelombang sinusoidal murni. Contoh gambar gelombang tegangan dan arus pada saat beban linear dapat dilihat pada gambar 2.3(a) bahwa gelombang arus *lagging* terhadap tegangan. Namun, dalam penerapannya terdapat gangguan yang dapat mengubah bentuk gelombang tegangan dan arus listrik dengan mengganggu frekuensi dasar seperti pada gambar 2.3(b). Gangguan ini biasanya disebut dengan gangguan harmonisa.



**Gambar 2.3** Gelombang Tegangan dan Arus pada (a) Beban Linear (b) Beban Non-linear

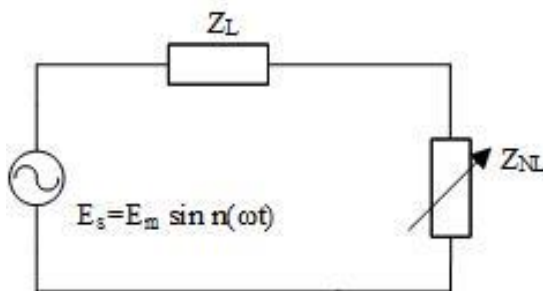
Harmonisa listrik adalah suatu gangguan dalam sistem tenaga listrik yang mengakibatkan bentuk gelombang tegangan dan arus bukan sinusoidal murni lagi melainkan jumlahan gelombang sinusoidal dasar dan gelombang harmonisanya [5]. Gelombang harmonisa adalah penjumlahan gelombang-gelombang sinusoidal dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi dasarnya yang mana nilai kelipatannya sama dengan orde harmonisanya dan bernilai bilangan bulat [5]. Nilai dari frekuensi harmonisa dirumuskan dengan  $f_h = h \times f$ , dengan  $f_h$  adalah frekuensi harmonisa,  $h$  adalah orde harmonisa yang bernilai bilangan bulat lebih dari 1, dan  $f$  adalah frekuensi dasar sistem tenaga listrik (di Indonesia menggunakan frekuensi dasar 50 Hz). Gangguan harmonisa disebabkan karena adanya beban non linear.



**Gambar 2.4** Proses Pembentukan Gelombang Terdistorsi Harmonisa [7]

Untuk penjelasan lebih lengkap, dapat dilihat pada gambar 2.4. Pada gambar tersebut, gambar yang terletak paling atas merupakan grafik sinusoidal murni dengan frekuensi dasar. Lalu terdapat gelombang sinusoidal harmonisa orde 3 dan 5 yang mana jumlahan dari kedua gelombang ini merupakan gelombang harmonisa. Hasil dari gangguan harmonisa adalah gelombang terdistorsi seperti gambar yang terletak paling bawah.

Harmonisa yang timbul dalam sistem tenaga listrik dapat dijelaskan dengan ilustrasi gambar rangkaian sederhana pada gambar 2.5. Rangkaian sederhana tersebut merupakan rangkaian Thevenin pengganti jaringan sistem tenaga listrik AC.  $E_s$  adalah sumber tegangan AC sinusoidal,  $E_m$  merupakan tegangan maksimum dari sumber tegangan AC sinusoidal,  $Z_L$  merupakan impedansi beban linear, dan  $Z_{NL}$  merupakan impedansi beban non linear.



**Gambar 2.5** Rangkaian Sederhana Jaringan Sistem Tenaga Listrik

Arus yang mengalir pada sistem tenaga listrik akibat beban non linear ( $i(t)$ ) adalah jumlah dari arus frekuensi dasar (orde 1) dengan arus harmonisa atau dapat dilihat seperti persamaan 2.9, yaitu :

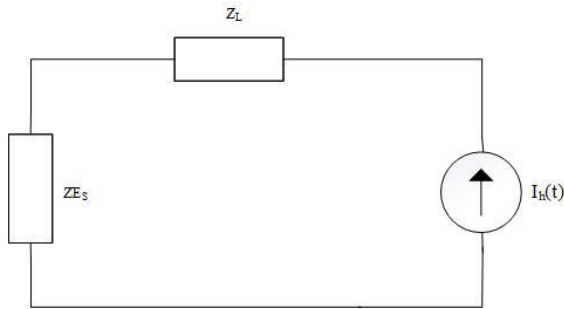
$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2.9)$$

dengan  $n$  adalah orde harmonisa,  $I_n$  adalah arus maksimum orde harmonisa ke- $n$ ,  $\omega_n$  adalah frekuensi sudut orde harmonisa ke- $n$ ,  $t$  adalah waktu, dan  $\varphi_n$  adalah pergeseran sudut fasa.

$E_s$  merupakan sumber tegangan AC sinusoidal murni sehingga belum terdapat gangguan harmonisa dan nilai  $E_s$  dalam analisis harmonisa bernilai nol, sedangkan arus harmonisa yang mengalir ( $i_h(t)$ ), yaitu :

$$i_h(t) = \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2.10)$$

Dengan demikian, rangkaian pengganti dari gambar 2. dalam menganalisis arus harmonisa dapat dilihat pada gambar 2.6 yang mana beban  $Z_{NL}$  berubah menjadi sumber arus harmonisa dan sumber tegangan  $E_s$  berubah menjadi beban dalam bentuk impedansi



**Gambar 2.6** Rangkaian Pengganti Jaringan Sistem Listrik Saat menganalisis Gangguan Harmonisa

Selanjutnya, digunakan hukum kirchoff I untuk menganalisis gangguan harmonisanya. Misalkan arah aliran arus yang digunakan dalam analisis hukum kirchoff ( $i_n(t)$ ) searah jarum jam maka berlaku persamaan berikut

$$\sum_{n=2}^{\infty} i_n(t) = -i_h(t) \quad (2.11)$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} i_n(t) = -\sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2.12)$$

sehingga untuk menganalisis tiap ordenya, nilai arusnya adalah

$$i_n(t) = -I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2.13)$$

$$i_n(t) = I_n \sin(\omega_n t - (\varphi_n + \pi)) \quad (2.14)$$

Dimisalkan  $\theta_n = \varphi_n + \pi$  maka

$$i_n(t) = I_n \sin(\omega_n t - \theta_n) \quad (2.15)$$

Dalam sistem tiga fasa, harmonisa yang dihasilkan sama seperti sistem satu fasa, yaitu harmonisa genap biasanya diabaikan karena resultan harmonisa ini dengan komponen dasar menghasilkan bentuk gelombang yang simetris [2]. Dalam analisis harmonisa sistem tiga fasa, harmonisa ditinjau berdasarkan konsep komponen simetris. Pada sistem tiga fasa seimbang, arus-arus dari sumber harmonisa tiga fasa seimbang dapat dikelompokkan berdasarkan arah putaran fasanya. Arus harmonisa pada tiap fasa akan mempunyai bentuk gelombang yang sama dan dianggap bahwa arus harmonisa merupakan arus pada frekuensi kelipatan ganjil dari frekuensi dasarnya sehingga bentuk gelombang yang dihasilkan adalah asimetri.

Pada sistem tiga fasa seimbang, penulis mengasumsikan urutan fasanya, yaitu R, S, dan T yang mana fasa R mendahului fasa S, dan fasa S mendahului fasa T. Dalam sistem asimetri, terdapat tiga jenis urutan fasa, yaitu [8]:

1. Komponen urutan positif (*positive sequence component*) merupakan komponen asimetri yang mempunyai tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya sehingga urutan fasanya, yaitu R, S, dan T.
2. Komponen urutan negatif (*negative sequence component*) merupakan komponen asimetri yang mempunyai tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar  $120^\circ$ , tetapi memiliki urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya sehingga urutan fasanya menjadi R, T, dan S.
3. Komponen urutan nol merupakan komponen asimetri yang mempunyai tiga fasor yang sama besarnya dengan pergeseran fasa sebesar nol derajat antara fasor yang satu dengan lainnya.

Komponen asimetri ini dapat terjadi pada tegangan atau arus dan jika fasornya dianggap sebagai arus maka arus tersebut dapat dinyatakan dengan  $I_R$ ,  $I_S$ , dan  $I_T$ . Ketiga komponen urutan tersebut dinyatakan dengan label 1 untuk komponen urutan positif ( $I_{R1}$ ,  $I_{S1}$ , dan  $I_{T1}$ ), 2 untuk

komponen urutan negatif ( $I_{R2}$ ,  $I_{S2}$ , dan  $I_{T2}$ ), dan 0 untuk untuk komponen urutan nol ( $I_{R0}$ ,  $I_{S0}$ , dan  $I_{T0}$ ).

## 2.4 Metode Fourier untuk Analisa Harmonisa

Bentuk gelombang tegangan dan arus pada PCC beban non linear dapat diperoleh dari transduser yang sesuai atau dihitung untuk kondisi pengoperasian yang ditentukan berdasarkan karakteristik beban non linear. Tahun 1822 J.B.J. Fourier mendalilkan bahwa setiap fungsi kontinyu berulang dalam interval  $T$  dapat diwakili oleh penjumlahan dari DC komponen, komponen sinusoidal fundamental, dan serangkaian komponen sinusoidal orde tinggi (harmonisa) pada frekuensi yang merupakan integer dari frekuensi fundamental. Analisis harmonisa adalah proses perhitungan magnitude dan fase dari gelombang periodik frekuensi fundamental dan orde tinggi. Sebagai hasil, deret Fourier menunjukkan hubungan antara fungsi domain-waktu fungsi dan domain frekuensi.

Menurut metode Fourier, suatu fungsi periodik dapat diuraikan menjadi fungsi-fungsi sinusoidal dengan frekuensi, amplitude, dan sudut fasa tertentu apabila memenuhi syarat-syarat:

- Merupakan fungsi periodik  $f(\omega t) = f(\omega t + T)$  dengan  $T$  = periode
- Merupakan fungsi kontinyu atau fungsi tak kontinyu dengan jumlah ketidakkontinyuan yang tertentu selama satu periode
- Selama selang periode, fungsi harus mempunyai harga rata-rata tertentu

Dalam satu periode  $T$ , fungsi harus mempunyai harga maksimum atau minimum yang jumlahnya tertentu

Apabila syarat-syarat diatas dipenuhi maka fungsi dapat diuraikan menjadi deret Fourier yang bentuknya sebagai berikut:

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega n t + b_n \sin \omega n t) \quad (2.16)$$

dengan:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) d(\omega t) \quad (2.17)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (2.18)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (2.19)$$

Penyederhanaan analisis Fourier dapat dilakukan dengan menggunakan sifat-sifat khusus sebagai berikut:

- Jika luas siklus positif dan negatif dalam satu periode sama maka  $a_0 = 0$
- Jika  $f(\omega_t) = -f(\omega_t + \pi)$  atau fungsi mempunyai simetri setengah gelombang maka tidak akan muncul harmonisa orde genap
- Jika fungsi merupakan fungsi genap  $f(\omega_t) = f(-\omega_t)$  maka  $b_n = 0$
- Jika fungsi merupakan fungsi ganjil  $f(\omega_t) = -f(\omega_t + \pi)$  maka  $a_n = 0$

Dengan menggunakan Metode Fourier pada bentuk gelombang arus yang diserap oleh komponen atau beban penyebab harmonisa maka dapat ditentukan komponen harmonisa yang dibangkitkannya. Selanjutnya dapat dihitung tingkat tegangan harmonisa pada jaringan.

## 2.5 Indeks Harmonisa

### 2.5.1 Individual Harmonic Distortion

*Individual Harmonic Distortion* (IHD) merupakan rasio antara nilai rms individu (tiap orde) dengan nilai rms dari frekuensi dasarnya. IHD dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$IHD_H = \frac{M_H}{M_1} \times 100\% \quad (2.20)$$

dengan  $H$  = orde harmonisa,  $M_H$  = nilai rms tegangan atau arus harmonisa pada orde ke- $H$ , dan  $M_1$  = nilai rms tegangan atau arus pada frekuensi dasar.



### 2.5.2 Total Harmonic Distortion

*Total Harmonic Distortion* (THD) merupakan indeks dalam menentukan kualitas daya listrik pada sistem transmisi dan distribusi. THD dinyatakan dalam persen (%) dan digunakan untuk mengetahui besarnya distorsi yang dihasilkan oleh seluruh komponen penghasil harmonisa [9]. THD terdiri dari THD tegangan ( $THD_v$ ) dan THD arus ( $THD_i$ ) [2]. Secara umum THD dirumuskan sebagai berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^{\infty} IHD_H^2}}{M_1} \times 100\% \quad (2.21)$$

dengan  $THD = Total Harmonic Distortion$  yang dapat berupa tegangan atau arus,  $H =$  orde harmonisa,  $IHD_H =$  nilai rms *Individual Harmonic Distortion* tegangan atau arus pada orde ke- $H$ ,  $M_1 =$  nilai rms tegangan atau arus pada frekuensi dasar.

### 2.5.3 Batas Distorsi Harmonisa

Standar yang biasa digunakan untuk menentukan batas distorsi harmonisa pada suatu perusahaan adalah standar IEEE 519-2014. Standar tersebut dibagi atas 2 kondisi yaitu untuk tegangan dan arus. Pada penentuan standar arus, standar yang diambil adalah pada rentang tegangan  $120 \text{ V} < V \leq 69 \text{ kV}$ . Standar distorsi harmonisa dapat dilihat pada tabel 2.1 dan tabel 2.2.

**Tabel 2.1** Standar IEEE 519-2014 untuk THD dan IHD tegangan [10]

Tegangan bus pada PCC	IHD <sub>v</sub> (%)	THD <sub>v</sub> (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5*
*Sistem Tegangan Tinggi bisa mencapai THD 2,0% dimana penyebabnya adalah terminal HVDC yang efeknya akan melemah di jaringan tempat pengguna selanjutnya terhubung.		

**Tabel 2.2** Standar IEEE 519-2014 untuk THD arus [10]

Distorsi harmonisa pada arus maksimum dalam persen terhadap $I_L$						
$I_{sc}/I_L$	Orde Individu dari Harmonisa (Orde Ganjil)					
	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	%TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 - 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 - 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari harmonisa orde ganjil diatas						
Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan dari peralatan DC seperti <i>halfwave converter</i>						
Seluruh peralatan pembangkit listrik dibatasi pada nilai – nilai arus tanpa perlu memperhatikan nilai aktual dari $I_{sc}/I_L$						
dimana :						
$I_{sc}$ = Nilai arus hubung singkat maksimum pada PCC						
$I_L$ = Nilai arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada PCC						

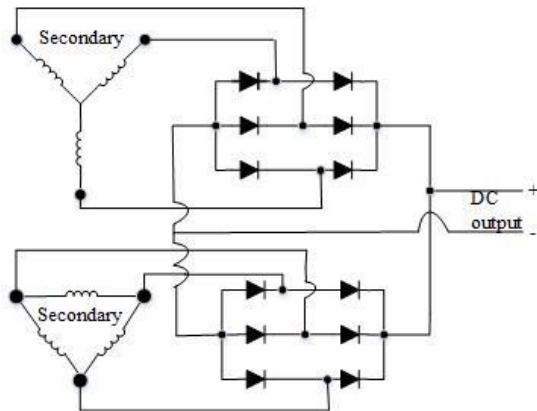
## 2.6 Konverter sebagai Sumber Harmonisa

Harmonisa bersumber dari beban non linear. Beban non linear adalah beban dengan nilai impedansinya berubah saat tegangan mencapai nilai tertentu. Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh beban non linear tidak akan sinusoidal karena akan mengandung komponen fundamental dan harmonisa [11]. Beban non linear umumnya adalah peralatan dengan komponen semikonduktor yang bekerja sebagai saklar. Keadaan saat sakelar bekerja akan menghasilkan gangguan gelombang non sinusoidal. Peralatan – peralatan penghasil harmonisa yang akan dibahas adalah konverter.

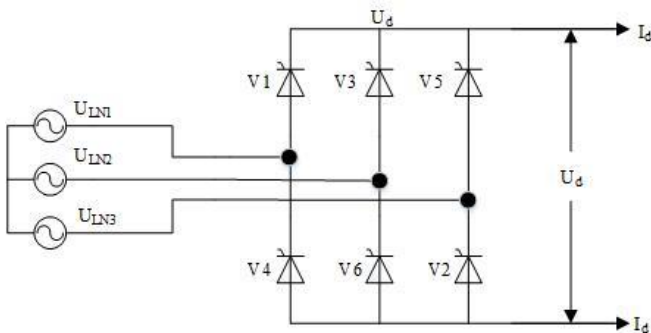
Konverter mengubah tegangan AC menjadi DC tetap menggunakan komponen *switching* berupa dioda ataupun thyristor. Bentuk gelombang tetap akan rusak dan menimbulkan harmonisa pada orde tertentu. Berdasarkan bentuk gelombang didapatkan 3 hal penting berupa [12] :

- Tidak ada harmonisa urutan 0
- Orde harmonisa yang dapat dibangkitkan oleh konverter dapat ditentukan dengan rumus :  

$$h = px \pm 1$$
 dengan  $h$  adalah orde harmonisa yang mungkin dibangkitkan,  $p$  adalah jumlah pulsa, dan  $x$  adalah bilangan asli (1, 2, 3,...).
- Pada harmonisa urutan positif maka harmonisa terjadi pada orde  $px+1$ , sedangkan urutan negatif terjadi pada harmonisa orde  $px-1$ .



(a)



(b)

**Gambar 2.7** (a) Konverter 12 Pulsa (b) Konverter 6 Pulsa

## 2.7 Pengaruh Harmonisa

Harmonisa menghasilkan 3 hal yaitu penurunan faktor daya, resonansi, dan torsi yang berlawanan. Seluruh hal tersebut dapat menurunkan kemampuan dan kualitas peralatan listrik. Peralatan yang terpengaruh oleh hal tersebut berupa relay, kabel transmisi, trafo, motor, dan generator. Harmonisa tersebut dapat merugikan sistem.

- Penurunan Faktor Daya

Nilai faktor daya akibat gangguan harmonisa dapat dirumuskan [13]:

$$true\ pf = \frac{1}{\sqrt{1+THDI^2}} \times \cos\phi \quad (2.22)$$

dengan keterangan *true pf* adalah faktor daya akibat gangguan harmonisa dan  $\cos \phi$  adalah faktor daya sebelum adanya gangguan harmonisa.

Faktor daya yang semakin kecil menyebabkan arus yang mengalir pada sistem kelistrikan meningkat sehingga menghasilkan rugi-rugi daya yang semakin besar. Rugi – rugi tersebut menyebabkan panas pada peralatan sehingga dapat merugikan sistem. Berdasarkan hal tersebut berikut dampak rugi – rugi dan panas akibat arus harmonisa [14] [15] :

- Panas tersebut dapat menyebabkan *derating* pada peralatan
  - Pada *switchgear* akan mengurangi kemampuan mengalirkan arus dan menyebabkan *aging* pada peralatan.
  - Arus harmonic yang diakibatkan oleh beban *arc furnace* akan menyebabkan kesalahan pada *setting relay*
  - CB/ Pemutus Daya dapat tidak bekerja pada arus pengenalnya
  - Pada trafo akan menurunkan kapasitas daya
- Resonansi

Kapasitor selain meningkatkan faktor daya memiliki kelemahan berupa timbulnya resonansi. Resonansi yang terjadi berupa resonansi seri dan parallel. Resonansi diakibatkan oleh kapasitor diikuti dengan naiknya arus yang melewati kapasitor. Kapasitor yang menghasilkan harmonisa biasanya adalah kapasitor bank. Harmonisa pada kapasitor bank akan

menyebabkan beban lebih dan motor gagal bekerja [16]. Selain itu dapat juga menambah rugi dielektrik serta *stress thermal* pada isolasi.

Dampak dari resonansi tersebut juga dapat mengakibatkan kesalahan pengukuran dari alat – alat ukur. Alat ukur (kWh) bekerja berdasarkan induksi dirancang untuk gelombang sinus. Harmonisa menambahkan elektromagnetik torsi dan kopel sehingga pengukuran akan lebih tinggi dan biaya listrik akan lebih mahal.

- Torsi yang berlawanan

Harmonisa pada motor dapat menghambat putaran motor. Hal tersebut terjadi karena adanya harmonisa urutan negatif. Jika hal ini terjadi akan memiliki dampak kerusakan pada rotor motor dan arus yang diserap oleh motor semakin besar sehingga rugi-rugi daya semakin besar juga [14].

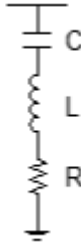
## **2.8 Filter Pasif Harmonisa**

Filter pasif digunakan untuk mereduksi amplitudo frekuensi tertentu dari sebuah distorsi tegangan atau arus. Filter terdiri dari kapasitor (C), Induktor (L) dan Resistor (R). Komponen utama untuk reduksi harmonisa tersebut adalah kapasitor dan Induktor. Pemasangan komponen tersebut dapat dilakukan secara seri ataupun paralel. Hal ini dimaksudkan untuk memperoleh rating tegangan dan daya reaktif yang diinginkan. Sedangkan induktor digunakan dalam rangkaian filter dirancang mampu menahan selubung frekuensi tinggi yaitu efek kulit Filter pasif. Secara umum filter pasif dapat dibedakan menjadi 3 jenis yaitu:

1. *Single Tuned Filter*
2. *Double Tuned Filter*
3. *High Pass Damp Filter Type*

### **2.8.1 Single Tuned Filter**

Single tone filter atau filter penalaan tunggal meredam hanya 1 orde harmonisa saja biasanya pada orde harmonisa rendah. Filter ini dirangkai dalam keadaan seri kapasitor, induktor dan resistor rangkaian filter *single tuned* dapat dilihat pada gambar 2.8



**Gambar 2.8** Rangkaian Single Tuned

Impedansi pada rangkaian ini biasanya bernilai rendah dan dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$Z(w) = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad 2.23$$

Kemudian dapat dihitung nilai setiap komponen (R,L dan C). Untuk mendapatkan nilai kapasitor maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \quad 2.24$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad 2.25$$

Setelah didapatkan nilai C maka barulah dapat diketahui nilai induktansi (L) dengan persamaan berikut:

$$X_L = X_C \quad 2.26$$

$$L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad 2.27$$

$$X_L = 2\pi f L \quad 2.28$$

Perhitungan selanjutnya adalah mendapatkan nilai resistansi. Sebelum menghitung nilai resistansi harus diketahui nilai faktor kualitas (Q) terlebih dahulu. Faktor kualitas bernilai antara 60 hingga 90 akan tetapi yang digunakan biasanya bernilai 45. Rumus resistansi dapat diketahui sebagai berikut:

$$R = \frac{X_L}{Q} \quad 2.29$$

### **2.8.2 Double Tuned Filter**

Double Tone Filter atau filter penalaan ganda terdiri atas 2 komponen single tone filter yang berada dalam kondisi paralel. Filter ini hanya akan bekerja pada 2 orde yang telah ditentukan saja. Filter ini memiliki beberapa kelemahan yaitu membutuhkan nilai kapasitor yang besar untuk mencapai performa yang sama seperti single tuned filter dan rugi – rugi daya tambahan pada resistor cukup besar. Double Tone Filter dapat didesain dengan cara berikut :

### **2.8.3 High Pass Filter**

High Pass Filter (HPF) yang digunakan hanya melewatkan frekuensi diatas frekuensi cut-offnya saja. HPF dapat memfilter orde 3, 5, dan 7 tetapi memiliki rugi – rugi daya yang lebih besar dibandingkan single tuned dan double tuned. Selain itu HPF membutuhkan tambahan biaya terhadap kapasitor dan kemungkinan membutuhkan rangkaian pemutus. Kelebihan dari HPF adalah dengan tahanan sebagai *damping* menghasilkan kriteria yang baik dan tidak terjadi resonansi pada sembarang frekuensi.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---



## **BAB 3**

### **SISTEM KELISTRIKAN DAN PEMODELAN PT SEMEN TONASA UNIT II DAN III**

#### **3.1 Sistem Kelistrikan di Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III Sulawesi Selatan**

PT Semen Tonasa Sulawesi Selatan adalah produsen semen terbesar di kawasan timur negara Republik Indonesia yang menempati lahan seluas 715 hektar di desa Bungoro, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, sekitar 68 kilometer dari kota Makassar yang bergerak di bidang industri semen yang mampu menghasilkan 2,5 juta ton semen per tahun. Pabrik ini terdiri dari beberapa unit, yaitu unit II, III, IV, dan V.

Pemodelan sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa unit II dan III disediakan langsung dari PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) berkapasitas 2x25 MW dan 2x35 MW dan PLN (Perusahaan Listrik Negara) bertegangan 70 kV. Setelah energi listrik bertegangan 70 kV disalurkan selanjutnya masuk ke trafo *step down* agar tegangannya turun menjadi 6,3 kV. Selanjutnya tegangan keluaran trafo tersebut langsung disalurkan ke masing-masing bus beban. Sebagian tegangan 6,3 kV ini diturunkan untuk disalurkan pada beban-beban tegangan rendah dengan rentang 400 volt hingga 690 volt tergantung beban motor yang beroperasi pada sistem kelistrikan tersebut dan sebagian lagi dinaikkan ke 22 kV yang kemudian diturunkan lagi menjadi 0,4 kV untuk menyuplai perumahan dan kantor.

Berikut adalah sumber energi listrik sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa unit II dan III yang ditunjukkan oleh tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Sumber Penyedia Daya Listrik di Pabrik Semen Tonasa unit II dan III Sulawesi Selatan

Kode Sumber	Type	Mode Operasi	Daya Terpasang (MW)
PLN	<i>Power Grid</i>	<i>Swing</i>	48
GenA	Generator	<i>Swing</i>	25
GenB	Generator	<i>Swing</i>	25
GenC	Generator	<i>Voltage control</i>	35
GenD	Generator	<i>Voltage control</i>	35

Pemodelan sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III menggunakan standar IEC (*International Electrotechnical Commission*) dengan frekuensi 50 Hz. Beban-beban pada tonasa unit II dan III bersumber dari dua transformator 18 MVA yang menurunkan tegangan dari 70 kV menjadi 6,3 kV.

Hasil dari pemodelan SLD (*Single Line Diagram*) sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III ditunjukkan pada gambar 3.1. Dalam merampungkan tugas akhir ini dilakukan sebuah analisis dari simulasi aliran daya dan tingkat distorsi harmonisa untuk mengetahui kondisi *existing* sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III. SLD sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Sulawesi Selatan dapat dilihat pada Lampiran 1.



### 3.1.1 Bus Pada Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III Sulawesi Selatan

Pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III ini terdapat total 79 bus, yakni 2 bus tegangan tinggi (70 kV), 46 bus tegangan menengah (6,3 – 22 kV), dan 31 bus tegangan rendah (0,4-0,69 kV). Namun, sebelum masuk ke sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III, terdapat 4 bus tegangan menengah (6,3 - 11kV) yang merupakan bus dari PLTU dan 1 bus tegangan tinggi (70 kV) yang merupakan bus transmisi dari PLN. Data bus-bus ini dapat dilihat pada tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Bus-Bus Sumber Sebelum Masuk ke Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

No.	Kode Bus	Tegangan (kV)	Sumber
1	BTGE.G01.BB6KV.01	6,3	GenA
2	BTGE.G02.BB6KV.01	6,3	GenB
3	BTGN.G01.BB11KV.02	11,0	GenC
4	BTGN.G02.BB11KV.02	11,0	Gen D
5	DIST.EBB70KV.02	70,0	GenA
6	DIST.EBB70KV.05	70,0	GenB
7	DIST.NBB70KV.02	70,0	GenC
8	DIST.NBB70KV.05	70,0	GenD
9	Bus 488	70,0	PLN

Dua bus tegangan tinggi pada sistem kelistrikan pabrik semen tonasa unit II dan III adalah Bus 316 dan Bus 359. Kedua bus ini bertegangan 70 kV seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.3 di bawah ini. Trafo ini menerima aliran listrik transmisi sejauh 14,8 km dari PLTU.

**Tabel 3.3** Bus Tegangan Tinggi Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

No.	Kode Bus	Tegangan (kV)
1	Bus 316	70
2	Bus 359	70

Setelah melewati Bus 316 dan Bus 359, bus ini kemudian dihubungkan menuju trafo *step down* dengan *Trafo ID* TRAFO LAMA dan TRAFO BARU yang berkapasitas masing-masing 18 MVA menuju bus tegangan menengah, yaitu BUSBAR, BUSBAR 1, BUSBAR 2, dan Bus 487. Data bus tegangan menengah dapat dilihat pada tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Bus Tegangan Menengah Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

No.	Kode Bus	Tegangan (kV)	No.	Kode Bus	Tegangan (kV)
1	BUSBAR	6,3	21	BUS 299	6,3
2	BUSBAR 1	6,3	22	BUS 303	6,3
3	BUSBAR 2	6,3	23	BUS 304	6,3
4	BUS 487	6,3	24	BUS 305	6,3
5	BUS 260	6,3	25	BUS 306	6,3
6	BUS 268	6,3	26	BUS 313	6,3
7	BUS 269	6,3	27	BUS 368	6,3
8	BUS 270	6,3	28	BUS 317	6,3
9	BUS 274	6,3	29	BUS 319	6,3
10	BUS 276	6,3	30	BUS 321	6,3
11	BUS 277	6,3	31	BUS 322	6,3
12	BUS 281	6,3	32	BUS 323	6,3
13	BUS 282	6,3	33	BUS 330	6,3
14	BUS 283	6,3	34	BUS 339	6,3
15	BUS 294	6,3	35	BUS 341	6,3
16	BUS 295	6,3	36	BUS 342	6,3
17	BUS 296	6,3	37	BUS 343	6,3

**Tabel 3.4** (lanjutan) Bus Tegangan Menengah Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

No.	Kode Bus	Tegangan (kV)	No.	Kode Bus	Tegangan (kV)
18	BUS 271	6,3	38	BUS 347	6,3
19	BUS 297	6,3	39	BUS 349	6,3
20	BUS 298	6,3	40	BUS 70	6,3

Setelah melewati bus tegangan menengah, beberapa motor listrik dipasang pada bus tersebut dan beberapa lagi disalurkan ke trafo. Untuk beban pada pabrik seluruhnya diturunkan menjadi tegangan rendah, tetapi untuk beban perumahan, tegangannya dinaikkan terlebih dahulu menjadi 22 kV lalu selanjutnya diturunkan menjadi 0,4 kV. Daftar bus 22 kV dapat dilihat pada tabel 3.5 dan daftar bus tegangan rendah dapat dilihat pada tabel 3.6.

**Tabel 3.5** Daftar Bus Tegangan 22 kV

No.	Kode Bus	Tegangan (kV)
1	BUS 354	22
2	BUS 65	22
3	BUS 355	22
4	BUS 356	22
5	BUS 357	22
6	BUS 361	22

**Tabel 3.6** Daftar Bus Tegangan Rendah

No.	Kode Bus	Tegangan (kv)	No.	Kode Bus	Tegangan (kV)
1	BUS ID FAN KILN 3	0,69	17	BUS 54	0,4
2	BUS ID FAN KILN 2	0,69	18	BUS 56	0,4
3	BUS MD KILN 2 1	0,556	19	BUS 60	0,4
4	BUS MD KILN 2 2	0,556	20	BUS 61	0,4
5	BUS MD KILN 3 1	0,525	21	BUS 62	0,4
6	BUS MD KILN 3 2	0,525	22	BUS 63	0,4
7	BUS 125	0,4	23	BUS 64	0,4
8	BUS 126	0,4	24	BUS 66	0,4
9	BUS 127	0,4	25	BUS 67	0,4
10	BUS 128	0,4	26	BUS 68	0,4
11	BUS 48	0,4	27	BUS 69	0,4
12	BUS 129	0,4	28	BUS 71	0,4
13	BUS 130	0,4	29	BUS 73	0,4
14	BUS 131	0,4	30	BUS 363	0,4

**Tabel 3.6** (lanjutan) Daftar Bus Tegangan Rendah

No.	Kode Bus	Tegangan (kv)	No.	Kode Bus	Tegangan (kV)
15	BUS 132	0,4	31	BUS 367	0,4
16	BUS 53	0,4			

### 3.2 Data Peralatan pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

#### 3.2.1 Transformator pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

Pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III terdapat 27 trafo yang terdiri dari 24 trafo MDB (*Main Distribution Board*) atau disebut dengan trafo distribusi dan 4 trafo motor.

Trafo Distribusi merupakan trafo yang terdiri dari banyak beban lalu dalam pemodelannya, beban-beban direpresentasikan menjadi beban *lumped load*, sedangkan trafo motor merupakan trafo yang digunakan khusus untuk menyuplai satu motor. Rincian data *rating*, besar pembebanan, dan persentase kerja daya kerja trafo distribusi dan trafo motor dapat dilihat pada tabel 3.7 dan tabel 3.8 secara berurutan. Persentase daya kerja beban diambil berdasarkan data pembebanan maksimum dalam bulan September 2017 yang jatuh pada tanggal 02 September 2017 pukul 20.00.

**Tabel 3.7** Rincian *Rating*, Daya Beban Terpasang, dan Persentase Kerja Beban pada Trafo Distribusi Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

Kode Trafo	<i>Rating</i> Trafo (kVA)	<i>Kode</i> <i>Beban</i>	<i>Kode</i> <i>Bus</i>	Daya Beban Terpa- sang (kVA)	Tegangan Beban (V)	Fak- tor Daya (%)	<i>Demand</i> <i>Factor</i> (%)
MDB LS CRUSHER 3	1600	Lump2 (0,8M+0,2 S)	Bus 125	1000	400	90	<i>off</i>
MDB LS DRYER	1600	Lump73 (0,8M+0,2 S)	Bus 126	1000	400	90	21,71
MDB RAW MILL 3	1600	Lump74 (0,8M+0,2 S)	Bus 127	160	400	88	66,35



**Tabel 3.7** (lanjutan) Rincian *Rating*, Daya Beban Terpasang, dan Persentase Kerja Beban pada Trafo Distribusi Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

Kode Trafo	<i>Rating</i> Trafo (kVA)	<i>Kode</i> <i>Beban</i>	<i>Kode</i> <i>Bus</i>	Daya Beban Terpasang (kVA)	Tegangan Beban (V)	Faktor Daya (%)	<i>Demand</i> <i>Factor</i> (%)
MDB F. MILL 3 (TR LAMA)	1600	Lump75 (0,8M+0,2 S)	Bus 128	194	400	90	65,91
MDB LS CR T2	800	Lump6 (0,8M+0,2 S)	Bus 48	643,5	400	84	12,66
MDB CLAY DRYER	1600	Lump76 (0,8M+0,2 S)	Bus 129	889,6	400	85	73,35
MDB RAW MILL 2	2500	Lump77 (0,8M+0,2 S)	Bus 130	1779,6	400	87	38,35
MDB CLAY CR T2	630	Lump9 (0,8M+0,2 S)	Bus 131	324,4	400	85	19,8
MDB FINISH MILL T2	1600	Lump79 (0,8M+0,2 S)	Bus 132	1550	400	88	44,84
MDB POWER STATION	1250	Lump11 (0,7M+0,3 S)	Bus 53	52	400	90	56,98
MDB 01 COAL MILL (SELATAN)	1600	Lump12 (0,8M+0,2 S)	Bus 54	1025	400	89	78,93
MDB 02 COAL MILL (UTARA)	1250	Lump13 (0,8M+0,2 S)	Bus 56	1000	400	87	82,76
MDB KILN 2	1600	Lump81 (0,8M+0,2 S)	Bus 60	1200	400	85	75
MDB WATER TREATMEN T	630	Lump15 (0,8M+0,2 S)	Bus 61	54	400	88	54,36
MDB RM BLEEDING	1600	Lump82 (0,8M+0,2 S)	Bus 62	330	400	90	10
MDB KILN 3	1600	Lump83 (0,8M+0,2 S)	Bus 63	157	400	86	50
MDB AUX PLANT	800	Lump18 (0,8M+0,2 S)	Bus 64	525,7	400	87	61,22

**Tabel 3.7** (lanjutan) Rincian *Rating*, Daya Beban Terpasang, dan Persentase Kerja Beban pada Trafo Distribusi Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

Kode Trafo	<i>Rating</i> Trafo (kVA)	<i>Kode</i> <i>Beban</i>	<i>Kode</i> <i>Bus</i>	Daya Beban Terpa- sang (kVA)	Tegangan Beban (V)	Fak- tor Daya (%)	<i>Demand</i> <i>Factor</i> (%)
MDB KANPUS	1600	Lump23 (0,1M+0,9 S)	Bus 66	800	400	95	84,87
MDB DIKLAT	2500	Lump24 (0,1M+0,9 S)	Bus 67	1250	400	95	54,32
MDB SEKSI	630	Lump25 (0,1M+0,9 S)	Bus 68	550	400	95	61,72
MDB DIREKSI	1600	Lump26 (0,1M+0,9 S)	Bus 69	776	400	95	87,49
MDB 01 PER. LAMA	400	Lump27 (0,1M+0,9 S)	Bus 363	213,7	400	95	18,47
MDB 02 PER. LAMA	600	Lump28 (0,1M+0,9 S)	Bus 367	288	400	95	13,75

**Tabel 3.8** Rincian *Rating*, Daya Beban Terpasang, dan Persentase Kerja Beban pada Trafo Motor Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

No .	Kode Trafo	<i>Rating</i> (MVA)	Tega- ngan (kV)	Kode Bus	Kode Beban	Tega- ngan Beban (kV)	Daya Be- ban	<i>Demand</i> <i>Factor</i> (%)
1	T5	0,630 / 0,315 / 0,315	6,300 / 0,525 / 0,525	BUS MD KILN 3 (1)	MD KILN 3 (1)	0,525	256 kW	63
				BUS MD KILN 3 (2)	MD KILN 3 (2)	0,525	256 kW	63

**Tabel 3.8** (lanjutan) Rincian *Rating*, Daya Beban Terpasang, dan Persentase Kerja Beban pada Trafo Motor Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

No .	Kode Trafo	Rating (MVA)	Tegangan (kV)	Kode Bus	Kode Beban	Tegangan Beban (kV)	Daya Beban	Demand Factor (%)
2	TR 2000 KVA	2	6,300 / 0,690	BUS ID FAN KILN 3	ID FAN KILN 3 (TR-BARU)	0,8	935 kW	70
3	TR-MD KILN 2	1,120 / 0,560 / 0,560	6,300 / 0,556 / 0,556	BUS MD KILN 2 (1)	MD KILN 2 (1)	0,3	250 HP	95
				BUS MD KILN 2 (2)	MD KILN 2 (2)	0,3	250 HP	95
4	TR ID FAN KILN 2	2	6,300 / 0,690	BUS ID FAN KILN 2	ID FAN KILN 2 (TR-BARU)	0,8	935 kW	57

### 3.2.2 Motor Tegangan Menengah Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

Pada pabrik Semen Tonasa Unit II dan III terdapat 13 motor listrik tegangan menengah 6,3 kV. Rincian data motor listrik tegangan menengah dapat dilihat pada tabel 3.9.

**Tabel 3.9** Rincian Data Motor Tegangan Menengah dan *Demand Factor*

No .	Kode Bus	Kode Motor	Tegangan (kV)	Daya	Faktor Daya (%)	Demand Factor (%)
1	BUS 270	MD 1 RAW MILL 3	6,3	1800 kW	87	69,28
2	BUS 274	MD 2 RAW MILL 3	6,3	1800 kW	87	67,99

**Tabel 3.9** (lanjutan) Rincian Data Motor Tegangan Menengah dan *Demand Factor*

No .	Kode Bus	Kode Motor	Tegangan (kV)	Daya	Faktor Daya (%)	<i>Demand Factor (%)</i>
3	BUS 276	FAN RAW MILL	6,3	1400 kW	87	74,35
4	BUS 277	MD CRUSHER 2	6,3	830 kW	87	45,11
5	BUS 281	MD 1 RAW MILL 2	6,3	1500 HP	87	28,67
6	BUS 282	MD 2 RAW MILL 2	6,3	1500 HP	87	28,67
7	BUS 283	MD 1 F.MILL 3	6,3	2000 kW	87	83,17
8	BUS 294	MD 2 F.MILL 3	6,3	2000 kW	87	81,73
9	BUS 295	MD 2 F.MILL 2 (1)	6,3	2250 HP	87	81,25
10	BUS 296	MD 2 F.MILL 2 (2)	6,3	2250 HP	87	82,61
11	BUS 306	MD COAL MILL 1	6,3	1000 kW	84	35,56
12	BUS 368	MD COAL MILL 2	6,3	1000 kW	82	35,56
13	BUS 330	EP FAN KILN 2	6,3	700 kW	85	8,27

### 3.2.3 Filter Harmonisa Pasif

Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III juga telah berupaya mereduksi gangguan harmonisa dengan memasang filter harmonisa pasif pada bus tegangan menengah 6,3 kV. Data filter harmonisa pasif yang terpasang pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III dapat dilihat pada tabel 3.10

**Tabel 3.10** Data Filter Pasif Harmonisa Tegangan Menengah

Kode Bus	Tegangan (kV)	Daya Kompensasi (kVAR)	Orde yang Difilter	Kode Filter	Tipe Filter	<i>Grounding</i>
Bus 487	6,3	6.000	5	Filter Tegangan Menengah	<i>Single Tuned</i>	Y

### 3.3 Sumber Harmonisa pada Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

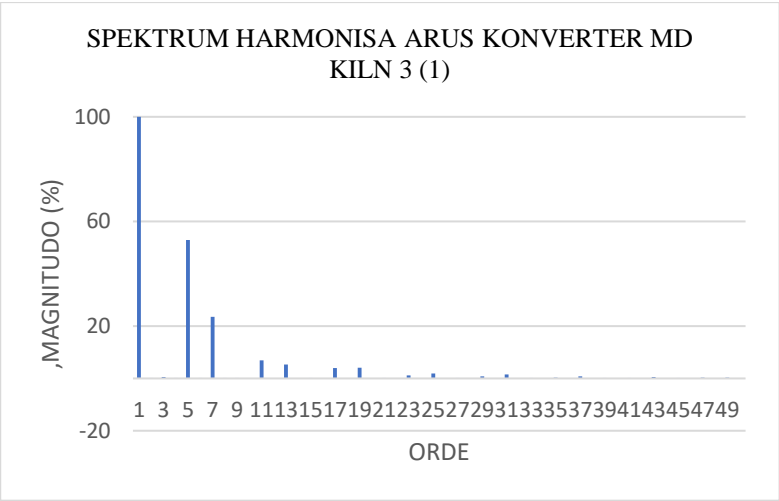
Sumber harmonisa yang akan ditinjau pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III dalam tugas akhir ini adalah konverter. Pada sistem kelistrikan pabrik ini konverter terdapat pada beban-beban trafo motor. Konverter yang terpasang pada trafo motor adalah CHARGER MD KILN 3 (1), CHARGER MD KILN 3 (2), CHARGER ID FAN KILN 3, CHARGER MD KILN 2 (1), CHARGER MD KILN 2 (2), dan CHARGER ID FAN KILN 2. Sumber-sumber harmonisa yang diuraikan tersebut memiliki karakteristik total harmonisa tegangan dan arus yang melebihi standar IEEE 519-2014. Berikut penyajian sumber harmonisa pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III Sulawesi Selatan ditunjukkan dalam tabel 3.11. Spektrum harmonisa dari masing-masing sumber ditampilkan pada gambar 3.2 – 3.7

**Tabel 3.11** Sumber Harmonisa Terbesar pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

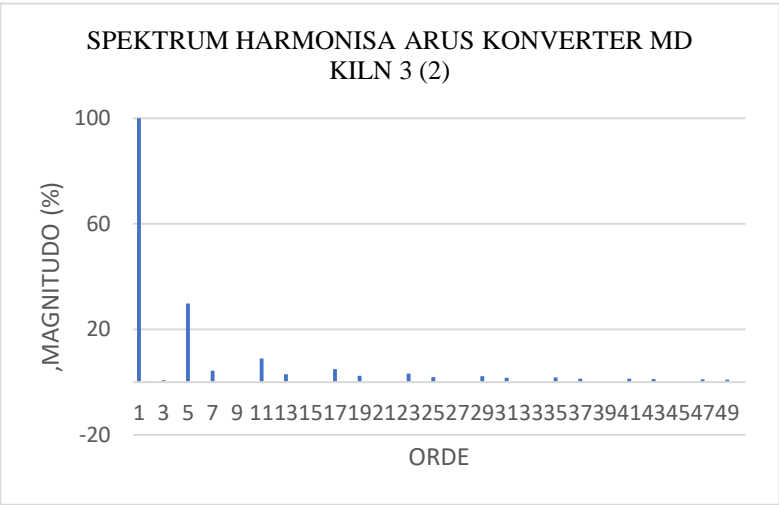
KODE BUS	KODE SUMBER	Daya Masukan (kVA)	$\cos \phi$ (%)	Efficiency (%)	Daya Keluaran (kW)	TIPE
BUS MD KILN 3 (1)	CHARGER MD KILN 3 (1)	414	90	95	354	<i>Current Source</i>
BUS MD KILN 3 (2)	CHARGER MD KILN 3 (2)	414	90	95	354	<i>Current Source</i>
BUS ID FAN KILN 3	CHARGER ID FAN KILN 3	1630	88	85	1219	<i>Current Source</i>

**Tabel 3.1112** (lanjutan) Sumber Harmonisa Terbesar pada Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III

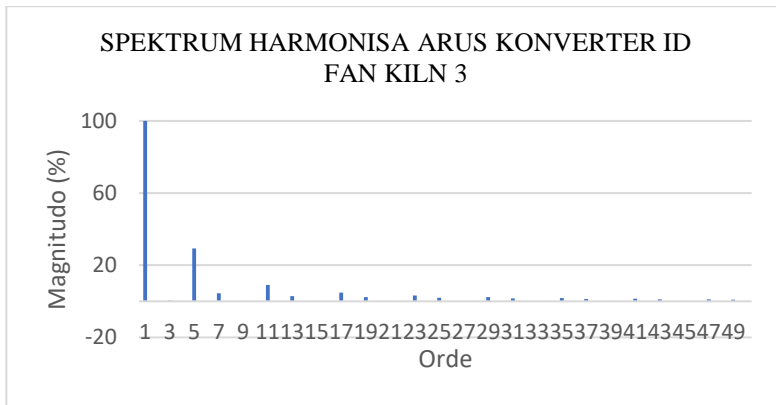
KODE BUS	KODE SUMBER	Daya Masukan (kVA)	cos φ (%)	Efficiency (%)	Daya Keluaran (kW)	TIPE
BUS MD KILN 2 (1)	CHARGER MD KILN 2 (1)	737	90	95	630	<i>Current Source</i>
BUS MD KILN 2 (2)	CHARGER MD KILN 2 (2)	737	90	95	630	<i>Current Source</i>
BUS ID FAN KILN 2	CHARGER ID FAN KILN 2	1630	88	85	1219	<i>Current Source</i>



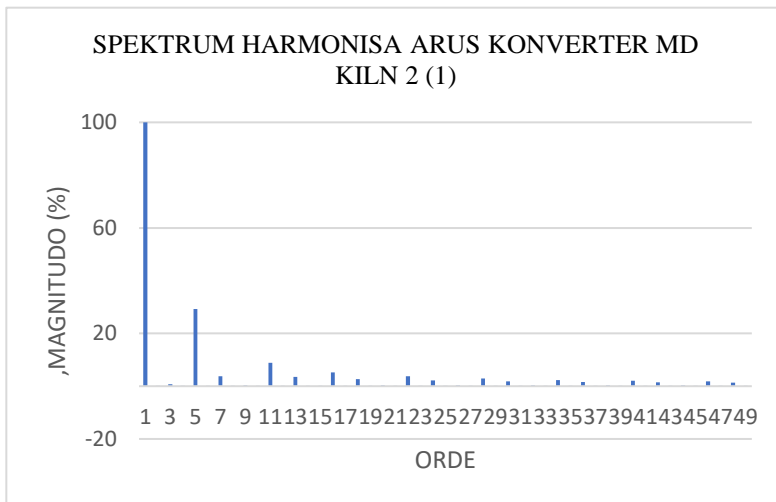
**Gambar 3.2** Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 3 (1)



**Gambar 3.3** Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 3 (2)

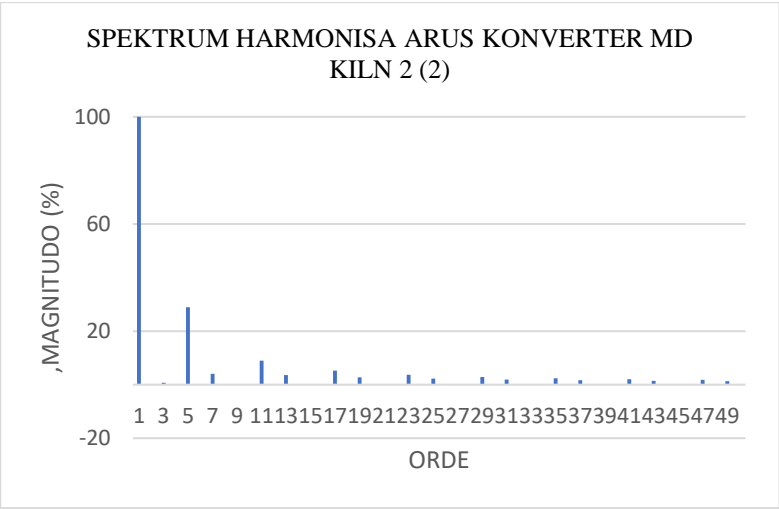


**Gambar 3.4** Spektrum Harmonisa Arus ID Fan Kiln 3

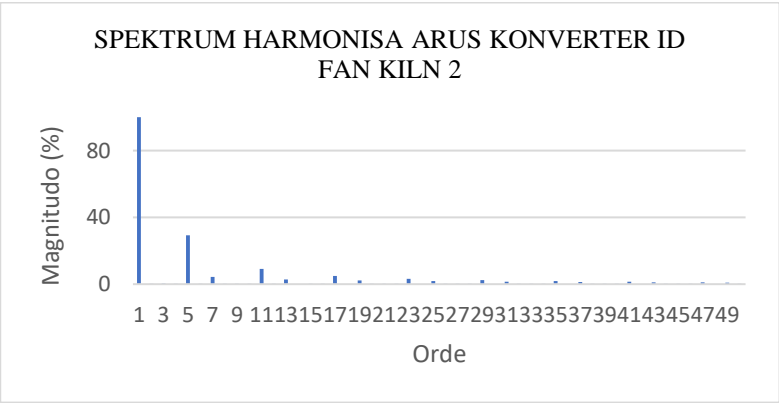


**Gambar 3.5** Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 2 (1)





**Gambar 3.6** Spektrum Harmonisa Arus MD Kiln 2 (2)



**Gambar 3.7** Spektrum Harmonisa Arus ID Fan Kiln 2

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

## BAB 4

### SIMULASI DAN ANALISIS GANGGUAN HARMONISA DAN PEMASANGAN FILTER PASIF HARMONISA PADA TEGANGAN RENDAH

#### 4.1 Simulasi dan Analisis *Load Flow* pada Bus Tegangan Menengah dan Bus Sumber Harmonisa

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai simulasi *load flow* pada bus tegangan menengah dan bus sumber harmonisa terpasang sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III. Simulasi ini menggunakan modul *Harmonic Load Flow* untuk mengidentifikasi pengaruh harmonisa terhadap tegangan dan arus. Data hasil simuasi *harmonic load flow* pada bus tegangan menengah dan bus sumber harmonisa terpasang dapat dilihat pada tabel 4.1

**Tabel 4.1** Data Hasil Simulasi *Load Flow* Kondisi *Existing* pada Bus Tegangan Menengah dan Bus Sumber Harmonisa

Kode Bus	Rating Tegangan (kV)	Tegangan pengaruh harmonisa (kV)	Arus Pengaruh Harmonisa (A)
Bus 487	6,300	6,120	967,7
BUSBAR	6,300	5,840	1538,9
BUSBAR 1	6,300	6,110	1105,3
BUSBAR 2	6,300	6,090	898,7
BUS MD KILN 3 (1)	0,525	0,510	247,8
BUS MD KILN 3 (2)	0,525	0,510	272,8
BUS ID FAN KILN 3	0,690	0,670	562,8
BUS MD KILN 2 (1)	0,556	0,540	539,9

**Tabel 4.1** (lanjutan) Data *Load Flow* pada Bus Tegangan Menengah dan Bus Sumber Harmonisa

Kode Bus	Rating Tegangan (kV)	Tegangan pengaruh pengaruh harmonisa (kV)	Arus Pengaruh Harmonisa (A)
BUS MD KILN 2 (2)	0,556	0,540	539,6
BUS ID FAN KILN 2	0,690	0,680	542,9

Dari tabel 4.1 dapat dilihat bahwa nilai tegangan pada bus tegangan menengah dan bus sumber harmonisa menurun akibat adanya gangguan harmonisa, sedangkan nilai arus yang mengalir akan meningkat apabila terdapat gangguan harmonisa. Hal ini lah yang mengakibatkan rugi-rugi daya semakin besar dan terjadi *drop* tegangan pada sistem kelistrikan.

## 4.2 Simulasi dan Analisis Gangguan Harmonisa

Simulasi gangguan harmonisa dilakukan saat filter *single tuned* pada bus 6,3 kV, yaitu Bus 487 masih terpasang (kondisi *existing*). Simulasi ini dijalankan untuk memperoleh perkiraan nilai THD<sub>V</sub> (*Total Harmonic Distortion Voltage*) dan THD<sub>I</sub> (*Total Harmonic Distortion Current*) pada masing-masing bus akibat beban-beban non-linear. Dalam melakukan analisis harmonisa pada kondisi *existing* sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III dipilih simulasi *Harmonic Analysis*. Pada menu *Edit Study Case*, *loading category* dipilih pada mode *normal*, sedangkan *generation category* dipilih pada mode *design*.

Sebelum memulai simulasi, data harmonisa dari beberapa sumber seperti yang telah ditampilkan pada tabel tabel 3.12 dimasukkan ke dalam *library* ETAP. Kita dapat memperoleh data dari nilai THD<sub>V</sub> dan THD<sub>I</sub> dari hasil simulasi *Harmonic Load Flow*. Nilai THD<sub>V</sub> dapat diamati melalui masing-masing bus, sedangkan nilai THD<sub>I</sub> dapat dilihat melalui kabel.

#### 4.2.1 Simulasi dan Analisis Gangguan Harmonisa Saat Filter Harmonisa Tegangan 6,3 kV Terhubung

Setelah data pengukuran gangguan harmonisa dimasukkan ke dalam *library* selanjutnya dilakukan simulasi gangguan harmonisa. Data harmonisa tegangan dan harmonisa arus pada bus sumber harmonisa dan bus tegangan menengah masing-masing dapat dilihat pada tabel 4.2 dan tabel 4.3. Kondisi tingkat harmonisa ini adalah kondisi saat filter harmonisa pada Bus 487 masih terhubung.

**Tabel 4.2** Besar  $THD_I$  dan  $THD_V$  pada Sumber Harmonisa saat Filter pada Bus 487 Terhubung

Sumber Harmonisa	$THD_I$ (%)	$THD_V$ (%)
CHARGER MD KILN 3 (1)	32,52	7,63
CHARGER MD KILN 3 (2)	32,51	8
CHARGER ID FAN KILN 3	32,04	8,33
CHARGER MD KILN 2 (1)	32,33	11,82
CHARGER MD KILN 2 (2)	32,14	11,56
CHARGER ID FAN KILN 2	35,99	8,07

**Tabel 4.3** Besar  $THD_V$  dan  $THD_I$  pada Bus Tegangan Menengah 6,3 kV saat Filter pada Bus 487 Terhubung

Kode Bus	$THD_V$ (%)	$THD_I$ (%)
Bus 487	1,20	1,04
BUSBAR	0,14	0,04
BUSBAR 1	1,23	3,78
BUSBAR 2	1,36	4,69

Pada tabel 4.2 dan 4.3 dapat dilihat bahwa pada saat pemasangan filter pasif harmonisa di bus tegangan menengah, nilai  $THD_V$  dan  $THD_I$

menurun pada bus tegangan menengah, tetapi pada bus tegangan rendah nilai  $THD_V$  dan  $THD_I$  masih sangat besar, hal ini dapat membahayakan trafo dan kabel yang terhubung dengan sumber harmonisa tersebut sehingga akan dilakukan pemasangan filter pada sisi tegangan rendah lalu dibandingkan tingkat keefektifannya dengan pemasangan filter tegangan menengah.

#### 4.2.2 Simulasi dan Analisis Harmonisa saat Filter Harmonisa Tegangan 6,3 kV Dilepas

Sebelum masuk ke dalam simulasi *Harmonic Load Flow*, standar harmonisa terlebih dahulu harus ditentukan pada tiap sumber gangguan harmonisa agar bisa diidentifikasi apakah gangguan tersebut masih dalam batas standar atau tidak. Bus-bus yang akan diidentifikasi adalah bus tegangan rendah dan sesuai standar IEEE 519-2014 pada tabel 2.1 bahwa bus bertegangan  $\leq 1$  kV memiliki batas  $THD_V$  8% dan batas  $IHD_V$  adalah 5%. Sementara itu, penentuan %TDD untuk setiap sumber gangguan harmonisa ditampilkan pada tabel 4.4 dengan keterangan  $I_{sc}$  adalah arus hubung singkat maksimum pada sumber harmonisa tersebut berada dan  $I_L$  adalah arus saat beban penuh sumber harmonisa tersebut. Penentuan %TDD ini sesuai dengan standar IEEE 519-2014 seperti pada tabel 2.2.

**Tabel 4.4** Penentuan Standar %TDD

Sumber Harmonisa	$I_{sc}$ (A)	$I_L$ (A)	$I_{sc} / I_L$	%TDD
CHARGER MD KILN 3 (1)	10.260	455,3	22,53	8
CHARGER MD KILN 3 (2)	10.260	455,3	22,53	8
CHARGER ID FAN KILN 3	19.130	1364	14,02	5
CHARGER MD KILN 2 (1)	16.710	709	23,57	8

**Tabel 4.4** (lanjutan) Penentuan Standar %TDD

Sumber Harmonisa	I <sub>sc</sub> (A)	I <sub>L</sub> (A)	I <sub>sc</sub> / I <sub>L</sub>	%TDD
CHARGER MD KILN 2 (2)	16.710	709	23,57	8
CHARGER ID FAN KILN 2	19.670	1364	14,42	5

Setelah standar ditentukan, selanjutnya dilakukan simulasi *Harmonic Load Flow* lagi untuk melihat tingkat gangguan harmonisa pada tiap sumber harmonisa setelah pelepasan filter harmonisa pada Bus 487. Tingkat gangguan harmonisa setelah pelepasan filter harmonisa pada Bus 487 dapat dilihat pada tabel 4.9.

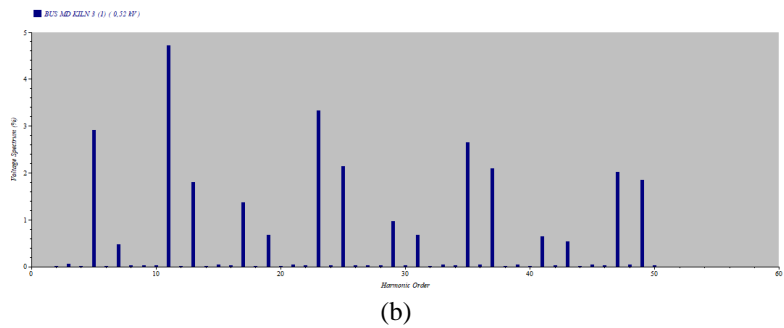
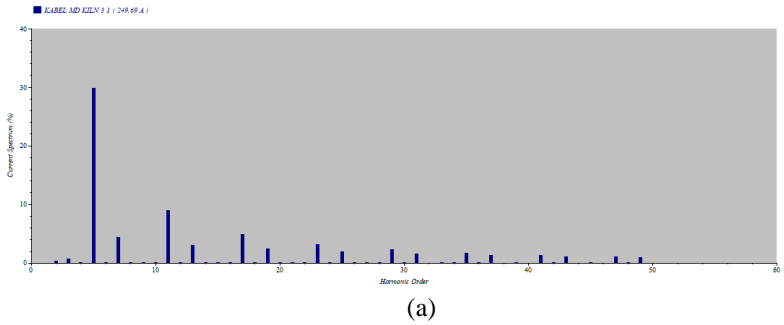
**Tabel 4.5** Besar THD<sub>I</sub> dan THD<sub>V</sub> pada Sumber Harmonisa saat Filter pada Bus 487 Dilepas

Sumber Harmonisa	THD <sub>I</sub> (%)	Standar IEEE %TDD	THD <sub>V</sub> (%)	Standar IEEE %THD <sub>V</sub>	Status
CHARGER MD KILN 3 (1)	32,52	8	9,43	8	PERLU PASANG FILTER
CHARGER MD KILN 3 (2)	32,51	8	9,32	8	PERLU PASANG FILTER
CHARGER ID FAN KILN 3	32,04	5	10,78	8	PERLU PASANG FILTER
CHARGER MD KILN 2 (1)	32,33	8	14,46	8	PERLU PASANG FILTER
CHARGER MD KILN 2 (2)	32,14	8	13,63	8	PERLU PASANG FILTER

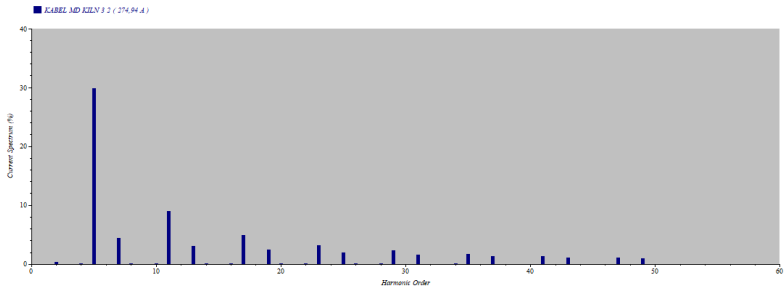
<b>Sumber Harmonisa</b>	<b>THD<sub>I</sub> (%)</b>	<b>Standar IEEE %TDD</b>	<b>THD<sub>V</sub> (%)</b>	<b>Standar IEEE %THD<sub>V</sub></b>	<b>Status</b>
CHARGER ID FAN KILN 2	35,99	5	10,47	8	<b>PERLU PASANG FILTER</b>

Dari hasil simulasi di atas, tingkat gangguan harmonisa setelah pelepasan filter harmonisa pada Bus 487 meningkat pada bus tegangan rendah dan tegangan menengah. Berdasarkan standar yang telah ditentukan maka perlu dilakukan pemasangan filter pasif harmonisa pada bus sumber harmonisa BUS MD KILN 3 (1), BUS MD KILN 3 (2), BUS ID FAN KILN 3, BUS MD KILN 2 (1), BUS MD KILN 2 (2), dan BUS ID FAN KILN 2. Spektrum orde harmonisa pada masing-masing bus dan kabel sumber harmonisa setelah pelepasan filter harmonisa pada Bus 487 dapat dilihat pada gambar 4.1 – 4.6.

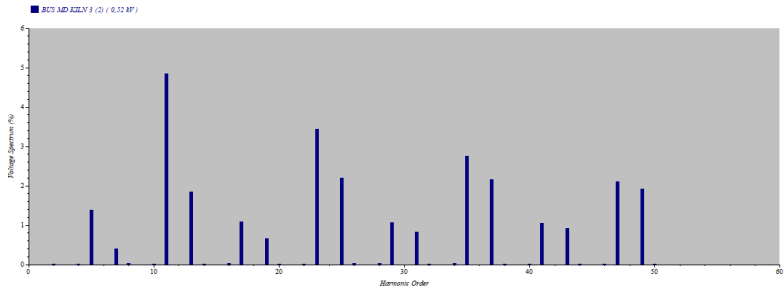




**Gambar 4.1** Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 3 (1) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan

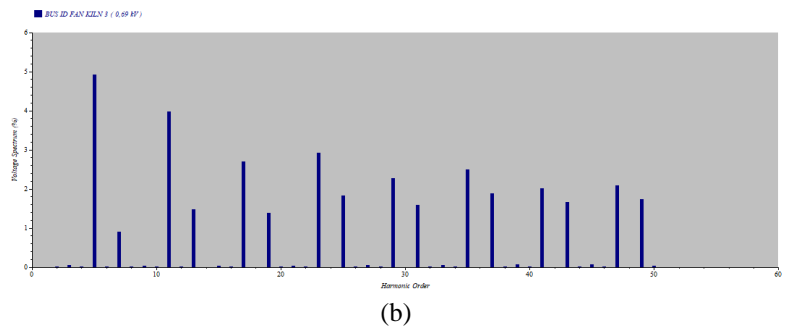
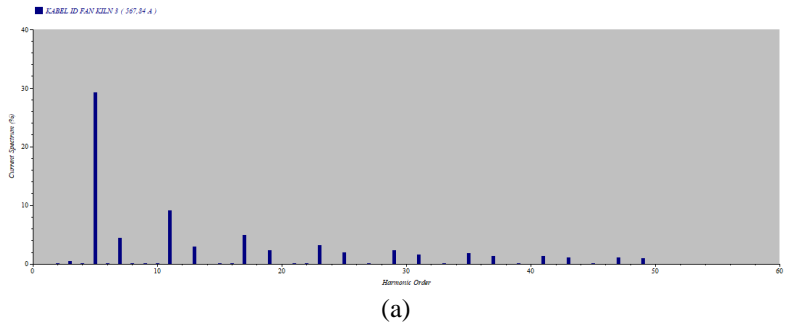


(a)

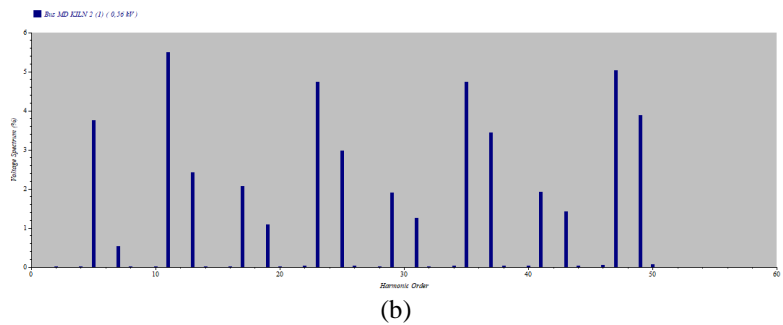
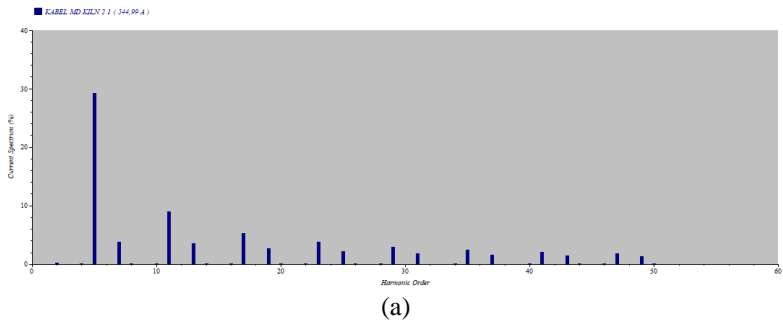


(b)

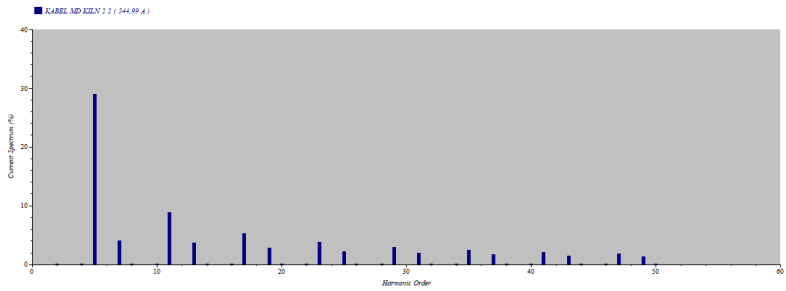
**Gambar 4.2** Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 3 (2) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan



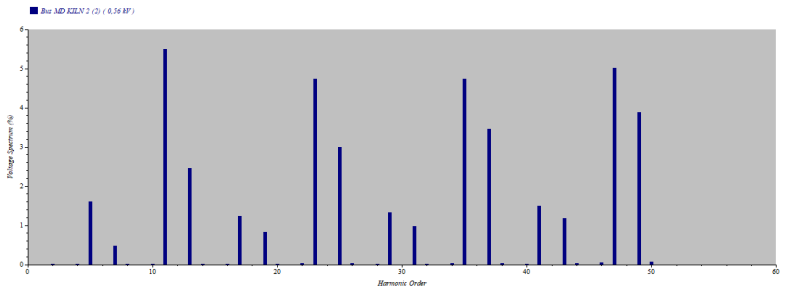
**Gambar 4.3** Spektrum Harmonisa Charger ID Fan Kiln 3 Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan



**Gambar 4.4** Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 2 (1) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan

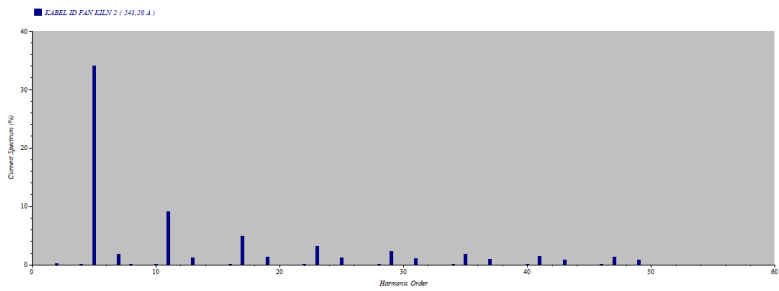


(a)

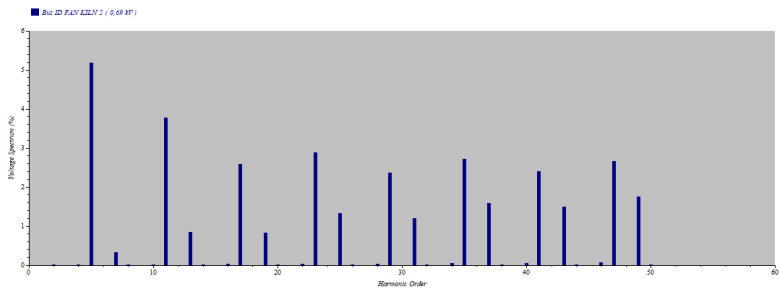


(b)

**Gambar 4.5** Spektrum Harmonisa Charger MD Kiln 2 (2) Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan



(a)



(b)

**Gambar 4.6** Spektrum Harmonisa Charger ID Fan Kiln 2 Setelah Pelepasan Filter Harmonisa pada Bus 487 (a) Arus (b) Tegangan

### 4.3 Desain Filter Pasif Harmonisa

Pada desain filter pasif harmonisa, penulis mengidentifikasi nilai  $IHD_V$  dan  $IHD_I$  lalu penulis menetapkan bahwa orde yang akan difilter adalah orde yang memiliki  $IHD_V > 5\%$  atau  $IHD_I > 3\%$ . Filter pasif harmonisa yang didesain akan diletakkan pada bus lokasi sumber harmonisa berada. Daya aktif yang digunakan adalah daya aktif saat beban sumber harmonisa bekerja penuh ( $P = S \times \cos \phi$ ).

Sebelum masuk ke perhitungan filter pasif harmonisa, nilai faktor daya akibat gangguan harmonisa terlebih dahulu harus dicari. Daftar nilai faktor daya akibat adanya gangguan harmonisa (*true pf*) dapat dilihat pada tabel 4.6 dengan  $\cos \phi$  adalah faktor daya saat tanpa adanya gangguan harmonisa.

**Tabel 4.6** Tabel Perhitungan Faktor Daya akibat Gangguan Harmonisa

Kode Bus Sumber Harmonisa	$\cos \phi$	$THD_I$ (%)	<i>true pf</i>
Bus MD KILN 3 (1)	0,90	32,52	$\frac{1}{\sqrt{1 + 0,3252^2}} \times 0,9 = 0,856$
Bus MD KILN 3 (2)	0,90	32,51	$\frac{1}{\sqrt{1 + 0,3251^2}} \times 0,9 = 0,814$
Bus ID FAN KILN 3	0,88	32,04	$\frac{1}{\sqrt{1 + 0,3204^2}} \times 0,88 = 0,838$
Bus MD KILN 2 (1)	0,90	32,33	$\frac{1}{\sqrt{1 + 0,3233^2}} \times 0,9 = 0,856$
Bus MD KILN 2 (2)	0,90	32,14	$\frac{1}{\sqrt{1 + 0,3214^2}} \times 0,9 = 0,857$
Bus ID FAN KILN 2	0,88	35,99	$\frac{1}{\sqrt{1 + 0,3599^2}} \times 0,9 = 0,828$

#### 4.3.1 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 3 (1)

Bus MD KILN 3 (1) memiliki faktor daya 85,6% lagging. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 100%. Daya reaktif kompensasi yang akan diinjeksikan ( $Q_C$ ) ke sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III melalui Bus MD KILN 3 (1) diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$Q_C = P \times (\tan(\cos^{-1}\phi_1) - \tan(\cos^{-1}\phi_2))$$

$$Q_C = 372,6 \times (\tan(\cos^{-1}0,856) - \tan(\cos^{-1}1))$$

$$Q_C = 372,6 \times (0,604 - 0)$$

$$Q_C = 225,147 \text{ kVar}$$

Besar daya reaktif kompensasi dari filter pasif harmonisa adalah sebesar 225,147 kVAR, tetapi dibulatkan menjadi 225 kVAR.

Berdasarkan hasil simulasi *Harmonic Load Flow*, nilai THD<sub>I</sub> dan THD<sub>V</sub> pada CHARGER MD KILN 3 (1) secara berurutan adalah 32,52% dan 9,38%. Nilai IHD, dan besar daya kompensasi masing-masing orde yang akan difilter dapat dilihat pada tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Orde yang akan Difilter pada Bus MD KILN 3 (1)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	IHD <sub>V</sub> (%)	IHD <sub>I</sub> (%)	Q <sub>C</sub> (kVAR)
5	2,92574	29,78	150
7	0,469337	4,34	15
11	4,73626	8,98	30
13	1,79932	3,01	5
17	1,37352	4,89	15
23	3,34464	3,21	10



Berdasarkan daya kompensasi yang telah ditetapkan, dipilih kapasitor produk ABB tipe CLMD 43, CLMD 53, CLMD 63, dan CLMD 83 dengan *rating* tegangan sebesar 600 volt.

### 1. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 5

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{150 \times 10^3} = 2,4 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 2,4} = 1326,29 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 5 \times 50)^2 (1326,29 \times 10^{-6})} = 0,306 \, mH$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,306 \times 10^{-3} = 0,096 \, \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,096}{45} = 0,002133 \, \Omega$

### 2. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 7

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 132,63 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 7 \times 50)^2 (132,63 \times 10^{-6})} = 1,559 \, mH$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,306 \times 10^{-3} = 0,490 \, \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,096}{45} = 0,010884 \, \Omega$

3. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 11

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{30 \times 10^3} = 12 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 12} = 265,26 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 11 \times 50)^2 (265,26 \times 10^{-6})} = 0,316 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,316 \times 10^{-3} = 0,099 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,099}{45} = 0,002204 \Omega$

4. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 13

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{5 \times 10^3} = 72 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 12} = 44,21 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 13 \times 50)^2 (44,21 \times 10^{-6})} = 1,356 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1,356 \times 10^{-3} = 0,426 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,099}{45} = 0,009467 \Omega$

5. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 17

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 12} = 132,63 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 17 \times 50)^2 (132,63 \times 10^{-6})} = 0,264 \, mH$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,264 \times 10^{-3} = 0,083 \, \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,083}{45} = 0,001845 \, \Omega$

6. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 23

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{10 \times 10^3} = 36 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 36} = 88,42 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 23 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 0,068 \, mH$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,264 \times 10^{-3} = 0,217 \, \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,217}{45} = 0,001512 \, \Omega$

Dengan demikian, data spesifikasi desain filter pasif harmonisa pada Bus MD KILN 3 (1) dapat dilihat pada tabel 4.8

**Tabel 4.8** Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 3 (1)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	$Q_C$ (kVA R)	Rating Tega- ngan (kV)	C ( $\mu$ F)	L (mH)	Q	R ( $\Omega$ )
5	150	0,6	1326,29	0,31	45	0,002
7	15	0,6	132,63	1,56	45	0,010
11	30	0,6	265,26	0,32	45	0,002
13	5	0,6	44,21	1,36	45	0,009
17	15	0,6	132,63	0,26	45	0,002
23	10	0,6	88,42	0,22	45	0,002

#### 4.3.2 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 3 (2)

Bus MD KILN 3 (2) memiliki faktor daya 81,4% lagging. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 100%. Daya reaktif kompensasi yang akan diinjeksikan ( $Q_C$ ) ke sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III melalui Bus MD KILN 3 (2) diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$Q_C = P \times (\tan (\cos^{-1} \varphi_1) - \tan (\cos^{-1} \varphi_2))$$

$$Q_C = 372,6 \times (\tan (\cos^{-1} 0,814) - \tan (\cos^{-1} 1))$$

$$Q_C = 372,6 \times (0,714 - 0)$$

$$Q_C = 265,913 \text{ kVar}$$

Besar daya reaktif kompensasi dari filter pasif harmonisa adalah sebesar 265,913 kVAR, tetapi dibulatkan menjadi 265 kVAR.

Berdasarkan hasil simulasi *Harmonic Load Flow*, nilai  $THD_I$  dan  $THD_V$  pada CHARGER MD KILN 3 (2) secara berurutan adalah 32,51% dan 9,28%. Nilai IHD, dan besar daya kompensasi masing-masing orde yang akan difilter dapat dilihat pada tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Orde yang akan Difilter pada Bus MD KILN 3 (2)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	IHD <sub>v</sub> (%)	IHD <sub>i</sub> (%)	Q <sub>c</sub> (kVAR)
5	1,38172	29,78	200
7	0,394665	4,34	10
11	4,87239	8,98	35
13	1,85344	3,01	5
17	1,09395	4,89	10
23	3,44998	3,21	5

Berdasarkan daya kompensasi yang telah ditetapkan, dipilih kapasitor produk ABB tipe CLMD 43, CLMD 53, CLMD 63, dan CLMD 83 dengan *rating* tegangan sebesar 600 volt.

**1.** Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 5

$$X_c = \frac{V_L^2}{Q_c} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_c = \frac{600^2}{200 \times 10^3} = 1,8 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 2,4} = 1768,39 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50)^2 (1768,39 \times 10^{-6})} = 0,229 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,229 \times 10^{-3} = 0,072 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,072}{45} = 0,0016 \Omega$$

## 2. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 7

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{10 \times 10^3} = 36 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 36} = 88,42 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 7 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 2,339 \, mH$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 2,339 \times 10^{-3} = 0,735 \, \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,735}{45} = 0,016327 \, \Omega$

## 3. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 11

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{35 \times 10^3} = 10,29 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 10,29} = 309,47 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 11 \times 50)^2 (309,47 \times 10^{-6})} = 0,271 \, mH$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,271 \times 10^{-3} = 0,085 \, \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,085}{45} = 0,001889 \, \Omega$

## 4. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 13

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{5 \times 10^3} = 72 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 12} = 44,21 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 13 \times 50)^2 (44,21 \times 10^{-6})} = 1,356 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1,356 \times 10^{-3} = 0,426 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,099}{45} = 0,009467 \Omega$

**5. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 17**

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{10 \times 10^3} = 36 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 36} = 88,42 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 17 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 0,397 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,397 \times 10^{-3} = 0,125 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,003}{45} = 0,03 \Omega$

**6. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 23**

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{5 \times 10^3} = 72 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 72} = 44,21 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 23 \times 50)^2 (44,21 \times 10^{-6})} = 0,433 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,433 \times 10^{-3} = 0,136 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,136}{45} = 0,003025 \Omega$$

Dengan demikian, data spesifikasi desain filter pasif harmonisa pada Bus MD KILN 3 (2) dapat dilihat pada tabel 4.10.

**Tabel 4.10** Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 3 (2)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	Q <sub>C</sub> (kVAR)	Rating Tega- ngan (kV)	C (μF)	L (mH)	Q	R (Ω)
5	200	0,6	1768,39	0,23	45	0,002
7	10	0,6	88,42	2,34	45	0,016
11	35	0,6	309,47	0,27	45	0,002
13	5	0,6	44,21	1,36	45	0,010
17	10	0,6	88,42	0,40	45	0,003
23	5	0,6	44,21	0,43	45	0,003

#### 4.3.3 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus ID FAN KILN 3

Bus ID FAN KILN 3 memiliki faktor daya 83,8% lagging. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 100%. Daya reaktif kompensasi yang akan diinjeksikan (Q<sub>C</sub>) ke sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III melalui Bus ID FAN KILN 3 diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$Q_C = P \times (\tan (\cos^{-1} \varphi_1) - \tan (\cos^{-1} \varphi_2))$$

$$Q_C = 1434,4 \times (\tan (\cos^{-1} 0,838) - \tan (\cos^{-1} 1))$$



$$Q_C = 1434,4 \times (0,651 - 0)$$

$$Q_C = 933,886 \text{ kVar}$$

Besar daya reaktif kompensasi dari filter pasif harmonisa adalah sebesar 933,886 kVAR, tetapi dibulatkan menjadi 930 kVAR.

Berdasarkan hasil simulasi *Harmonic Load Flow*, nilai THD<sub>I</sub> dan THD<sub>V</sub> pada CHARGER ID FAN KILN 3 secara berurutan adalah 32,04% dan 10,72%. Nilai IHD, dan besar daya kompensasi masing-masing orde yang akan difilter dapat dilihat pada tabel 4.11.

**Tabel 4.11** Orde yang akan Difilter pada Bus ID FAN KILN 3

ORDE YANG AKAN DIFILTER	IHD <sub>V</sub> (%)	IHD <sub>I</sub> (%)	Q <sub>C</sub> (kVAR)
5	4,94253	29,23	650
7	0,900956	4,42	60
11	3,99894	9,12	125
17	2,7141	4,9	60
23	2,92242	3,21	35

Berdasarkan daya kompensasi yang telah ditetapkan, dipilih kapasitor produk ABB tipe CLMD 43, CLMD 53, CLMD 63, dan CLMD 83 dengan *rating* tegangan sebesar 600 volt.

#### 1. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 5

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{650 \times 10^3} = 0,554 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 2,4} = 5747,26183 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 5 \times 50)^2 (5747,26183 \times 10^{-6})} = 0,071 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,071 \times 10^{-3} = 0,022 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,022}{45} = 0,000492 \Omega$

## 2. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 7

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{60 \times 10^3} = 6 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 36} = 530,52 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 7 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 0,390 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,390 \times 10^{-3} = 0,122 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,122}{45} = 0,002721 \Omega$

## 3. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 11

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{125 \times 10^3} = 2,88 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 10,29} = 1105,24 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 11 \times 50)^2 (1105,24 \times 10^{-6})} = 0,076 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,076 \times 10^{-3} = 0,024 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,024}{45} = 0,000529 \Omega$$

#### 4. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 17

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{60 \times 10^3} = 6 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 36} = 530,52 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 17 \times 50)^2 (530,52 \times 10^{-6})} = 0,066 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,066 \times 10^{-3} = 0,021 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,021}{45} = 0,000461 \Omega$$

#### 5. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 23

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{35 \times 10^3} = 10,29 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 72} = 309,47 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 23 \times 50)^2 (44,21 \times 10^{-6})} = 0,062 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,433 \times 10^{-3} = 0,019 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,019}{45} = 0,000432 \Omega$$

Dengan demikian, data spesifikasi desain filter pasif harmonisa pada Bus ID FAN KILN 3 dapat dilihat pada tabel 4.12.

**Tabel 4.12** Spesifikasi Desain Filter Bus ID FAN KILN 3

ORDE YANG AKAN DIFILTER	$Q_C$ (kVAR)	Rating Tegangan (kV)	C ( $\mu$ F)	L (mH)	Q	R ( $\Omega$ )
5	650	0,6	5747,26	0,07	45	0,001
7	60	0,6	530,52	0,39	45	0,003
11	125	0,6	1105,24	0,08	45	0,001
13	60	0,6	530,52	0,07	45	0,001
17	35	0,6	309,47	0,06	45	0,001
23	650	0,6	5747,26	0,07	45	0,001

#### 4.3.4 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 2 (1)

Bus MD KILN 2 (1) memiliki faktor daya 85,6% lagging. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 100%. Daya reaktif kompensasi yang akan diinjeksikan ( $Q_C$ ) ke sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III melalui Bus MD KILN 2 (1) diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$Q_C = P \times (\tan (\cos^{-1} \varphi_1) - \tan (\cos^{-1} \varphi_2))$$

$$Q_C = 663,3 \times (\tan (\cos^{-1} 0,856) - \tan (\cos^{-1} 1))$$

$$Q_C = 663,3 \times (0,603 - 0)$$

$$Q_C = 399,969 \text{ kVar}$$

Besar daya reaktif kompensasi dari filter pasif harmonisa adalah sebesar 399,969 kVAR, tetapi dibulatkan menjadi 400 kVAR.

Berdasarkan hasil simulasi *Harmonic Load Flow*, nilai  $THD_I$  dan  $THD_V$  pada CHARGER MD KILN 2 (1) secara berurutan adalah 32,33% dan 14,38%. Nilai IHD, dan besar daya kompensasi masing-masing orde yang akan difilter dapat dilihat pada tabel 4.13.

**Tabel 4.13** Orde yang akan Difilter pada Bus MD Kiln 2 (1)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	IHD <sub>v</sub> (%)	IHD <sub>i</sub> (%)	Q <sub>c</sub> (kVAR)
5	3,76823	29,25	300
7	0,523541	3,73	15
11	5,51118	8,91	30
13	2,43584	3,49	15
17	2,07136	5,22	25
23	4,74902	3,75	15

Berdasarkan daya kompensasi yang telah ditetapkan, dipilih kapasitor produk ABB tipe CLMD 43, CLMD 53, CLMD 63, dan CLMD 83 dengan *rating* tegangan sebesar 600 volt.

**1.** Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 5

$$X_c = \frac{V_L^2}{Q_c} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_c = \frac{600^2}{300 \times 10^3} = 1,2 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 1,2} = 2652,58 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 50)^2 (2652,58 \times 10^{-6})} = 0,153 \, mH$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,153 \times 10^{-3} = 0,048 \, \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,048}{45} = 0,001067 \, \Omega$$

2. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 7

$$X_C = \frac{V_{IL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 132,63 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 7 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 1,559 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1,559 \times 10^{-3} = 0,490 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,490}{45} = 0,010884 \Omega$

3. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 11

$$X_C = \frac{V_{IL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{30 \times 10^3} = 12 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 12} = 265,26 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 11 \times 50)^2 (265,26 \times 10^{-6})} = 0,316 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,316 \times 10^{-3} = 0,099 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,099}{45} = 0,002204 \Omega$

4. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 13

$$X_C = \frac{V_{IL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 132,63 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 13 \times 50)^2 (132,63 \times 10^{-6})} = 0,452 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,452 \times 10^{-3} = 0,142012 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,142012}{45} = 0,003156 \Omega$$

##### 5. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 17

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{25 \times 10^3} = 14,4 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 14,4} = 221,05 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 17 \times 50)^2 (221,05 \times 10^{-6})} = 0,159 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,159 \times 10^{-3} = 0,050 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,050}{45} = 0,001107 \Omega$$

##### 6. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 23

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 132,63 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 23 \times 50)^2 (132,63 \times 10^{-6})} = 0,144 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,144 \times 10^{-3} = 0,045 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,045}{45} = 0,001008 \Omega$$

Dengan demikian, data spesifikasi desain filter pasif harmonisa pada Bus MD KILN 2 (1) dapat dilihat pada tabel 4.14.

**Tabel 4.14** Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 2 (1)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	Q <sub>C</sub> (kVAR)	Rating Tega- ngan (kV)	C (μF)	L (mH)	Q	R (Ω)
5	300	0,6	2652,58	0,153	45	0,001
7	15	0,6	132,63	1,559	45	0,011
11	30	0,6	265,26	0,316	45	0,002
13	15	0,6	132,63	0,452	45	0,003
17	25	0,6	221,05	0,159	45	0,001
23	15	0,6	132,63	0,144	45	0,001

#### 4.3.5 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus MD KILN 2 (2)

Bus MD KILN 2 (2) memiliki faktor daya 85,7% lagging. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 100%. Daya reaktif kompensasi yang akan diinjeksikan (Q<sub>C</sub>) ke sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III melalui Bus MD KILN 2 (2) diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$Q_C = P \times (\tan (\cos^{-1} \varphi_1) - \tan (\cos^{-1} \varphi_2))$$

$$Q_C = 663,3 \times (\tan (\cos^{-1} 0,857) - \tan (\cos^{-1} 1))$$

$$Q_C = 663,3 \times (0,602 - 0)$$



$$Q_c = 399,137 \text{ kVar}$$

Besar daya reaktif kompensasi dari filter pasif harmonisa adalah sebesar 399,137 kVAR, tetapi dibulatkan menjadi 400 kVAR.

Berdasarkan hasil simulasi *Harmonic Load Flow*, nilai THD<sub>I</sub> dan THD<sub>V</sub> pada CHARGER MD KILN 2 (2) secara berurutan adalah 32,14% dan 13,57%. Nilai IHD, dan besar daya kompensasi masing-masing orde yang akan difilter dapat dilihat pada tabel 4.15.

**Tabel 4.15** Orde yang akan Difilter pada Bus MD Kiln 2 (2)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	IHD <sub>V</sub> (%)	IHD <sub>I</sub> (%)	Q <sub>c</sub> (kVAR)
5	1,60203	29,25	300
7	0,472574	3,73	15
11	5,50823	8,91	30
13	2,46871	3,49	15
17	1,23135	5,22	25
23	4,7433	3,75	15
47	5,02137	1,8	5

Berdasarkan daya kompensasi yang telah ditetapkan, dipilih kapasitor produk ABB tipe CLMD 43, CLMD 53, CLMD 63, dan CLMD 83 dengan *rating* tegangan sebesar 600 volt.

#### 1. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 5

$$X_c = \frac{V_u^2}{Q_c} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_c = \frac{600^2}{300 \times 10^3} = 1,2 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 1,2} = 2652,58 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 5 \times 50)^2 (2652,58 \times 10^{-6})} = 0,153 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,153 \times 10^{-3} = 0,048 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,048}{45} = 0,001067 \Omega$

## 2. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 7

$$X_C = \frac{V_{IL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 132,63 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 7 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 1,559 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 1,559 \times 10^{-3} = 0,490 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,490}{45} = 0,010884 \Omega$

## 3. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 11

$$X_C = \frac{V_{IL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{30 \times 10^3} = 12 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 12} = 265,26 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 11 \times 50)^2 (265,26 \times 10^{-6})} = 0,316 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,316 \times 10^{-3} = 0,099 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,099}{45} = 0,002204 \Omega$$

#### 4. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 13

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 132,63 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 13 \times 50)^2 (132,63 \times 10^{-6})} = 0,452 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,452 \times 10^{-3} = 0,142 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,142}{45} = 0,003156 \Omega$$

#### 5. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 17

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{20 \times 10^3} = 18 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 18} = 176,84 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 17 \times 50)^2 (176,84 \times 10^{-6})} = 0,198 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,198 \times 10^{-3} = 0,062 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,062}{45} = 0,001384 \Omega$

**6. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 23**

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{15 \times 10^3} = 24 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 132,63 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 23 \times 50)^2 (132,63 \times 10^{-6})} = 0,144 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,144 \times 10^{-3} = 0,045 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,045}{45} = 0,001008 \Omega$

**7. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 47**

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{5 \times 10^3} = 72 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 72} = 44,21 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 47 \times 50)^2 (44,21 \times 10^{-6})} = 0,104 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,104 \times 10^{-3} = 0,033 \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,033}{45} = 0,000724 \Omega$

Dengan demikian, data spesifikasi desain filter pasif harmonisa pada Bus MD KILN 2 (2) dapat dilihat pada tabel 4.16.

**Tabel 4.16** Spesifikasi Desain Filter Bus MD KILN 2 (2)

<b>ORDE YANG AKAN DIFILTER</b>	<b>Q<sub>C</sub> (kVAR)</b>	<b>Rating Tega- ngan (kV)</b>	<b>C (μF)</b>	<b>L (mH)</b>	<b>Q</b>	<b>R (Ω)</b>
5	300	0,6	2652,58	0,153	45	0,0010 67
7	15	0,6	132,63	1,559	45	0,0108 84
11	30	0,6	265,26	0,316	45	0,0022 04
13	15	0,6	132,63	0,452	45	0,0031 56
17	20	0,6	176,84	0,198	45	0,0013 84
23	15	0,6	132,63	0,144	45	0,0010 08
47	5	0,6	44,21	0,104	45	0,0007 24

#### 4.3.6 Desain Filter Pasif Harmonisa pada Bus ID FAN KILN 2

Bus ID FAN KILN 2 memiliki faktor daya 82,8% lagging. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 100%. Daya reaktif kompensasi yang akan diinjeksikan (Q<sub>C</sub>) ke sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III melalui Bus ID FAN KILN 2 diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$Q_C = P \times (\tan(\cos^{-1}\varphi_1) - \tan(\cos^{-1}\varphi_2))$$

$$Q_C = 663,3 \times (\tan(\cos^{-1}0,828) - \tan(\cos^{-1}1))$$

$$Q_C = 663,3 \times (0,677 - 0)$$

$$Q_c = 971,360 \text{ kVar}$$

Besar daya reaktif kompensasi dari filter pasif harmonisa adalah sebesar 971,360 kVAR, tetapi dibulatkan menjadi 970 kVAR.

Berdasarkan hasil simulasi *Harmonic Load Flow*, nilai THD<sub>I</sub> dan THD<sub>V</sub> pada CHARGER ID FAN KILN 2 secara berurutan adalah 35,99% dan 10,42%. Nilai IHD, dan besar daya kompensasi masing-masing orde yang akan difilter dapat dilihat pada tabel 4.17.

**Tabel 4.17** Orde yang akan Difilter pada Bus MD Kiln 2 (2)

ORDE YANG AKAN DIFILTER	IHD <sub>V</sub> (%)	IHD <sub>I</sub> (%)	Q <sub>C</sub> (kVAR)
5	5,19931	34	800
11	3,79802	9,03	100
17	2,59568	4,83	60
23	2,88804	3,19	10

Berdasarkan daya kompensasi yang telah ditetapkan, dipilih kapasitor produk ABB tipe CLMD 43, CLMD 53, CLMD 63, dan CLMD 83 dengan *rating* tegangan sebesar 600 volt.

#### 1. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 5

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{800 \times 10^3} = 0,45 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 0,45} = 7073,55 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 5 \times 50)^2 (7073,55 \times 10^{-6})} = 0,057 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,057 \times 10^{-3} = 0,018 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,018}{45} = 0,0004 \Omega$$

### 2. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 11

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{100 \times 10^3} = 3,6 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 884,19 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 11 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 0,095 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,095 \times 10^{-3} = 0,030 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,030}{45} = 0,000661 \Omega$$

### 3. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 17

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi n f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{60 \times 10^3} = 6 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 12} = 530,52 \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 11 \times 50)^2 (265,26 \times 10^{-6})} = 0,066 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,066 \times 10^{-3} = 0,021 \Omega$$

$$\text{Dipilih } Q = 45, R = \frac{0,021}{45} = 0,000461 \Omega$$

#### 4. Perhitungan Filter *Single Tuned* Orde 23

$$X_C = \frac{V_U^2}{Q_C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad L = \frac{1}{(2\pi m f)^2 C} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$

$$X_C = \frac{600^2}{10 \times 10^3} = 36 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 24} = 88,42 \, \mu F$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \times 23 \times 50)^2 (88,42 \times 10^{-6})} = 0,217 \text{ mH}$$

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0,217 \times 10^{-3} = 0,068 \, \Omega$$

Dipilih  $Q = 45$ ,  $R = \frac{0,068}{45} = 0,001512 \, \Omega$

Dengan demikian, data spesifikasi desain filter pasif harmonisa pada Bus MD KILN 2 (2) dapat dilihat pada tabel 4.18.

**Tabel 4.18** Spesifikasi Desain Filter Bus ID FAN KILN 2

ORDE YANG AKAN DIFILTER	Q <sub>C</sub> (kVAR)	Rating Tega- ngan (kV)	C (μF)	L (mH)	Q	R (Ω)
5	800	0,6	7073,55	0,057	45	0,0004
11	100	0,6	884,19	0,095	45	0,0007
17	60	0,6	530,52	0,066	45	0,0005
23	10	0,6	88,42	0,217	45	0,0015



## **4.4 Perbandingan Gangguan Harmonisa Setelah Pemasangan Filter Pasif Harmonisa Sisi Tegangan Rendah**

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perbandingan tingkat gangguan harmonisa antara pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah dengan pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan menengah. Objek bus yang akan dibandingkan tingkat gangguan harmonisanya adalah bus tegangan menengah 6,3 kV pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tonasa Unit II dan III, yaitu Bus 487, BUSBAR, BUSBAR 1, dan BUSBAR 2 dan bus tegangan rendah tempat sumber harmonisa berada, yaitu BUS MD KILN 3 (1), BUS MD KILN 3 (2), BUS ID FAN KILN 3, BUS MD KILN 2 (1), BUS MD KILN 2 (2), dan BUS ID FAN KILN 2.

### **4.4.1 Simulasi dan Analisis Rugi-Rugi Daya Setelah Pemasangan Filter Tegangan Rendah**

Pada sub bab ini, akan dianalisis perbedaan rugi-rugi daya pada trafo TRAFO BARU, trafo distribusi sebelum masuk ke BUSBAR 487, saat pemasangan filter tegangan menengah dan filter tegangan tegangan rendah.

Berdasarkan hasil simulasi *load flow* diperoleh nilai rugi-rugi daya pada TRAFO BARU saat pemasangan filter tegangan menengah sebesar 15,479 kW, sedangkan setelah pemasangan filter tegangan rendah adalah sebesar 16,419 kW. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai rugi-rugi daya saat pemasangan filter tegangan menengah lebih rendah dibandingkan dengan pemasangan filter tegangan rendah. Hal ini dikarenakan daya kompensasi dari filter tegangan rendah dibatasi oleh *rating* trafo tegangan rendah.

### **4.4.2 Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Rendah**

Data  $THD_V$  dan  $THD_I$  antara pemasangan filter harmonisa rendah dan pemasangan filter harmonisa sisi tegangan menengah ditampilkan pada tabel 4.19.

**Tabel 4.19** Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Rendah antara Pemasangan Filter Tegangan Menengah dan Pemasangan Filter Tegangan Rendah

Kode Bus	Pemasangan Filter Tegangan Menengah		Pemasangan Filter Tegangan Rendah	
	THD <sub>V</sub> (%)	THD <sub>I</sub> (%)	THD <sub>V</sub> (%)	THD <sub>I</sub> (%)
BUS MD KILN 3 (1)	7,63	32,52	1,30	2,96
BUS MD KILN 3 (2)	8	32,51	1,58	2,81
BUS ID FAN KILN 3	8,33	32,04	0,79	0,69
BUS MD KILN 2 (1)	11,82	32,33	2,31	3,21
BUS MD KILN 2 (2)	11,56	32,14	3,89	4,30
BUS ID FAN KILN 2	8,07	35,99	0,88	0,57

Dari data di atas dapat dilihat bahwa semua THD<sub>V</sub> dan THD<sub>I</sub> di bus tegangan rendah menurun setelah pemasangan filter harmonisa tegangan rendah sehingga dapat disimpulkan bahwa pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah dapat memangkas harmonisa pada sisi tegangan rendah lebih baik dibandingkan dengan pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan menengah.

#### **4.4.3 Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Menengah, Bus 487**

Setelah tingkat gangguan harmonisa dibandingkan pada sisi tegangan rendah, selanjutnya sub bab ini akan membandingkan tingkat gangguan harmonisa pada sisi tegangan menengah.

Data THD<sub>V</sub> dan THD<sub>I</sub> antara pemasangan filter harmonisa rendah dan pemasangan filter harmonisa sisi tegangan menengah ditampilkan pada tabel 4.20

**Tabel 4.20** Perbandingan Tingkat Gangguan Harmonisa pada Bus Tegangan Menengah antara Pemasangan Filter Tegangan Menengah dan Pemasangan Filter Tegangan Rendah

Kode Bus	Pemasangan Filter Tegangan Menengah		Pemasangan Filter Tegangan Rendah	
	THD <sub>V</sub> (%)	THD <sub>I</sub> (%)	THD <sub>V</sub> (%)	THD <sub>I</sub> (%)
Bus 487	1,20	1,04	0,23	0,10
BUSBAR	0,14	0,04	0,00	0,01
BUSBAR 1	1,23	3,78	0,23	0,10
BUSBAR 2	1,36	4,69	0,24	0,14

Dari data di atas dapat dilihat bahwa semua THD<sub>V</sub> dan THD<sub>I</sub> di bus tegangan menengah menurun setelah pemasangan filter harmonisa tegangan rendah sehingga dapat disimpulkan bahwa pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah dapat memangkas harmonisa pada sisi tegangan menengah lebih baik dibandingkan dengan pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan menengah.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari pembahasan yang telah dibahas, penulis dapat menarik kesimpulan bahwa pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah jauh lebih efektif dibandingkan dengan pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan menengah. Hal ini dapat dilihat dengan perbandingan  $THD_I$  dan  $THD_V$  pada bus tegangan rendah dan menengah. Salah satu contoh pada sisi tegangan rendah, yaitu Bus ID Fan Kiln 2, jika ditinjau saat pemasangan filter tegangan menengah nilai  $THD_I$  dan  $THD_V$  masing-masing adalah 35,99% dan 8,07%, sedangkan saat pemasangan filter tegangan rendah nilai  $THD_I$  dan  $THD_V$  masing-masing adalah 0,57% dan 0,88%. Begitu juga jika ditinjau pada sisi tegangan menengah, yaitu pada BUSBAR 2, jika ditinjau saat pemasangan filter tegangan menengah nilai  $THD_I$  dan  $THD_V$  masing-masing adalah 4,69% dan 1,36%, sedangkan saat pemasangan filter tegangan rendah nilai  $THD_I$  dan  $THD_V$  masing-masing adalah 0,14% dan 0,24%, tetapi rugi-rugi daya yang diredam saat pemasangan filter tegangan menengah lebih tinggi dibandingkan dengan pemasangan filter tegangan rendah. Dengan demikian, pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah lebih efektif dalam memangkas gangguan harmonisa, tetapi rugi-rugi daya yang diredam lebih rendah daripada pemasangan filter tegangan menengah.

#### **5.2 Saran**

Berikut saran yang perlu dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya adalah

1. Perlu penelitian lebih lanjut optimalisasi pemilihan filter tegangan rendah dan filter tegangan menengah agar dapat meredam gangguan harmonisa dan menghasilkan rugi-rugi daya lebih rendah.
2. Pengaruh pemasangan filter pasif harmonisa pada sisi tegangan rendah terhadap stabilitas dan keandalan sistem pembangkit, terutama terhadap peralatan pembangkit utama seperti generator dan transformator serta pengaruhnya terhadap peralatan proteksi.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] “PT Semen Tonasa,” *Profil Singkat*, 07-Nov-2017. [Daring]. Tersedia pada: [http://sementonasa.co.id/profile\\_brief.php](http://sementonasa.co.id/profile_brief.php).
- [2] M. K. Soni dan N. Soni, “Review of causes and effect of harmonics on power system,” *Int. J. Sci. Eng. Technol. Res.*, vol. 3, no. 2, hlm. 214–220, 2014.
- [3] S. S. Sumarno, O. Penangsang, dan N. K. Aryani, “Studi Analisis dan Mitigasi Harmonisa pada PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh,” *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [4] F. Kappeler, “The Influence of Harmonic Injection on Power, Efficiency and Stability of Trapatt Amplifiers,” dalam *Microwave Conference, 1979. 9th European*, 1979, hlm. 548–552.
- [5] O. Penangsang, *Diktat Kuliah Kualitas Daya Listrik*. ITS.
- [6] P. Riese, *Manual of Power Factor Correction*. Teningen: Frako, 2012.
- [7] A. Pramnanto, “Analisis Penggunaan Single Tuned Filter sebagai Salah Satu Solusi Masalah Harmonik pada Beban Rumah Tangga,” *J. UI*, 2008.
- [8] A. Soeprajitno, *Diktat Kuliah Analisa Sistem Tenaga Listrik*. ITS.
- [9] F. A. Samman, R. Ahmad, dan M. Mustafa, “Perancangan, Simulasi dan Analisis Harmonisa Rangkaian Inverter Satu Fasa,” *J. Nas. Tek. Elektro Dan Teknol. Inf. JNTETI*, vol. 4, no. 1, 2015.
- [10] IEEE STANDARD ASSOCIATION, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” *IEEE Stand. Assoc.*, 2014.
- [11] H. Prasetyo, “ANALISA PERANCANGAN FILTER PASIF UNTUK MEREDAM HARMONIK PADA INSTALASI BEBAN NONLINEAR,” *TECHNO J. Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Purwok.*, vol. 13, no. 1, hlm. 57–67, 2012.
- [12] H. Irawan, H. Hermawan, dan T. Sukmadi, “Analisis pengaruh pemasangan filter pasif terhadap penurunan harmonik pada sistem multi mesin 9 bus IEEE,” Diponegoro University, 2011.
- [13] T. M. Parreiras, J. C. G. Justino, A. V. Rocha, dan B. de J. C. Filho, “True Unit Power Factor Active Front End for High-Capacity Belt-Conveyor Systems,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, Jun 2016.
- [14] J.C. Das, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, 1 ed. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2015.

- [15] H. Ramadhan, “Studi Pengaruh Harmonisa terhadap Rele Arus Lebih untuk Pengamanan Sistem Distribusi di PT. ISPAT INDO,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2011.
- [16] A. S. Prabowo, “Perencanaan Filter Harmonisa Pada Sisi Tegangan Rendah Untuk Mengurangi Harmonisa Akibat Penambahan Beban Pada Sistem Kelistrikan PT. Wilmar Gresik,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.



## **BIOGRAFI PENULIS**



Jason Dinovan Todo Tambun, lahir di Makassar pada tanggal 25 Juli 1997. Penulis merupakan putra pertama dari tiga bersaudara. Anak dari pasangan Nanti Tambun dan Risma Damanik ini memulai jenjang pendidikan di TK Tonasa II, SDS Tonasa II, SMP Negeri 2 Pangkajene, dan SMA Negeri 17 Makassar hingga lulus pada tahun 2014. Pada tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama kuliah, penulis aktif dalam organisasi Persekutuan Mahasiswa Kristen ITS. Penulis juga pernah mengikuti beberapa organisasi lainnya, diantaranya Divisi Workshop HIMATEKTRO ITS dan ELECTRA 2017. Penulis dapat dihubungi melalui email [jason.dinovan14@mhs.ee.its.ac.id](mailto:jason.dinovan14@mhs.ee.its.ac.id).

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Single Line Diagram PT SEMEN TONASA

